

TÉCNICAS INSTRUMENTALES APLICADAS A LA METALÚRGIA NUMISMÁTICA: POSIBILIDADES Y LIMITACIONES

José Manuel Compañía Prieto

Introducción

Desde mi acceso a los estudios universitarios, me interesó particularmente la aplicación de los conocimientos analíticos y metalúrgicos que iba adquiriendo, al estudio del Patrimonio Histórico. Tras varios intentos por iniciar una línea de investigación arqueométrica en la Universidad de Málaga, nuestros esfuerzos dieron fruto en 2007, iniciándose la caracterización de materiales arqueológicos, principalmente cerámicos, en lo que constituye mi Tesis Doctoral, si bien se intercalan ocasionalmente algunos estudios de material numismático. Cuando se me invitó a participar en un conjunto de estudios sobre moneda gallega aportando una panorámica sobre la aplicación de las técnicas analíticas a la numismática pasaron mi mente no pocos investigadores, mucho más expertos, que podrían hablar más y mejor sobre el tema. No obstante, tras un periodo de reflexión, consideré finalmente que la visión de un ingeniero químico, aficionado durante muchos años a los estudios numismáticos, podría contribuir positivamente al debate y, de forma quizá algo temeraria, acepté la invitación. En un principio, se deliberó intensamente sobre cual sería la orientación más adecuada para esta contribución, sin llegar a un acuerdo definitivo. El didáctico precedente sentado en el I Encuentro Peninsular de Numismática Antigua por Peixoto (1995), finalmente hizo considerar preferible un enfoque generalista sobre las técnicas analíticas y el tipo de información se puede obtener de ellas, tratando su aplicación a casos gallegos cuando ello fuese posible.

Análisis ¿por qué y para qué?

Un principio elemental en todo estudio arqueométrico, sea de la naturaleza que sea, es el planteamiento un objetivo a cumplir. Este objetivo normalmente suele ser responder a una pregunta específica. La inversión de tiempo y dinero realizada en un estudio de esta naturaleza, será rentabilizada únicamente si las preguntas iniciales están bien planteadas. En caso contrario, se obtendrá un conjunto de datos sobre el que se puede especular todo lo que se quiera, pero de escasa o nula utilidad.

Establecido este principio, inmediatamente cabe preguntarse por la naturaleza de la información que se puede obtener de un estudio arqueometalúrgico, especialmente en el caso numismático. Un buen punto de partida al que referirse, especialmente para el lector hispanohablante, es el dado por Montero, García y López-Romero (2007: 25). Según los mismos, en la Arqueometría pueden definirse los siguientes campos de actuación: 1. Datación, 2. Análisis físico-químicos de materiales, 3. Estudios paleoambientales, 4. Prospección geofísica y teledetección espacial y 5. Métodos matemáticos y estadísticos. Algunos autores cuestionan este último campo, aunque por la particular naturaleza de los estudios arqueométricos, es posiblemente en el que mayor desarrollo propio cabe esperar. Para el caso que se tratará, el análisis arqueometalúrgico de elementos numismáticos, la mayor parte de la información suele ser de naturaleza físico-química.

Dentro de la caracterización físico-química de materiales, puede obtenerse información sobre muy diversos aspectos de los elementos en estudio. En el caso numismático, quizá los más destacables serían los siguientes:

- Identificación del material utilizado.
- Tecnología utilizada.
- Procedencia y rutas comerciales, a través del estudio de las materias primas.
- Estilo y autenticidad.
- Conservación, desde el diagnóstico a la restauración.

No todos estos aspectos son fácilmente determinables, ni tampoco tienen el mismo potencial para proporcionar información histórica o económica. Seguramente, la información histórica de mayor interés que puede extraerse de los análisis de numismas sea la tecnológica y la propiamente composicional.

El estudio de las técnicas aplicadas en la fabricación de moneda, es una de las posibles medidas del conocimiento metalúrgico de una sociedad. Los procesos de fabricación de moneda en si mismos es cierto que han variado poco a lo largo de la historia desde la introducción de la moneda acuñada, hacia el siglo VIII-VII a.C. Sin embargo, existen sutiles aunque importantes diferencias. La fabricación de los cospeles, por ejemplo, ha evolucionado desde la fabricación por fusión en moldes individuales, pasando por el conocido método del “racimo”, hasta la fabricación de láminas metálicas de las que los cospeles son recortados a mano por cizallas o mediante máquinas. La acuñación en sí misma también ha experimentado modificaciones, desde la acuñación a mano mediante mazas hasta el estampado mediante prensas. También es una innovación tecnológica importante la aplicación del *cordoncillo* al canto de las piezas a partir de la Edad Moderna, para evitar su limado o recorte (Gil, 1993: 19). También son de gran interés las tecnologías utilizadas en el blanqueamiento de moneda para aparentar una mejor ley, como son la inmersión de los cospeles de vellón en vinagre caliente antes de la acuñación para producir la disolución selectiva del cobre, el plateado mediante sales de plata, amalgamas o estaño, por citar sólo unos cuantos ejemplos (Cope, 1972; Vlachou-Mogire *et alii*, 2007). Capítulo aparte, de gran interés, es el estudio de las falsificaciones de moneda, como son las piezas forradas en la antigüedad. Todos estos aspectos tecnológicos precisan de estudios mediante metodologías específicas, normalmente utilizadas en Ciencia de los Materiales.

Por su parte, el análisis elemental de las aleaciones permite normalmente extraer conclusiones de naturaleza económica, estudiando por ejemplo la evolución del contenido de metal noble cuando se pretenden analizar fenómenos inflacionarios. En este sentido, el proceso de reducción paulatina de la ley del denario romano durante el Imperio es bien conocido (Butcher y Ponting, 2005; Gitler y Ponting, 2003; Pense, 1992). Por diversas cuestiones, la amonedación hispana todavía no es tan bien conocida como la romana en estos aspectos. Sin embargo, en el caso de los denarios ibéricos, puede indudablemente apuntarse que la ley de las emisiones es inferior a la de sus coetáneos republicanos (Gozalbes, 2009: 130-131). El conocimiento exacto del comportamiento de estas emisiones no es una cuestión baladí, puesto que la aparición del denario ibérico parece claro que está asociada a las necesidades económicas romanas durante sus operaciones en Hispania (Domínguez, 1997: 116-117). En consecuencia, la diferencia entre las leyes de ambos numerarios puede conducir a errores en cálculos económicos basados en los volúmenes de emisión y/o en las estimaciones de la masa de metal noble circulante, como los realizados por Villaronga (1995: 74-

78) o García (1999). Es patente, pues, el interés de las técnicas analíticas para resolver cuestiones en este campo.

Metales, el sustrato monetario por excelencia

A lo largo de la historia, el ser humano ha utilizado una gran variedad de elementos con finalidad económica. De la larga lista pueden destacarse los cauríes (conchas del molusco *Cypraea aurora*) utilizados en África y Asia, las monedas de porcelana chinas, ciertas monedas de necesidad hechas de cuero, o incluso los sellos-moneda utilizados en la Guerra Civil española (Gil, 1993: 58-60). Salvo algunas excepciones como las citadas, desde que el hombre conoce y domina la metalurgia, la práctica totalidad de sus monedas han sido metálicas. A ello contribuyen las propiedades especiales de ciertos metales. Los metales son ideales para la fabricación de moneda: se pueden fundir y trabajar con relativa facilidad, son perdurables en el tiempo, fácilmente divisibles (es decir, se pueden tomar porciones de mayor o menor tamaño, según las necesidades del momento) y, lo más importante de todo, algunos de ellos tienen por su escasez en la naturaleza un alto valor intrínseco: los metales nobles. Por este motivo, los principales metales utilizados para la fabricación de moneda han sido el oro y la plata. No obstante, el uso de los mismos para piezas de escaso valor utilizaría una cantidad de metal muy reducida, resultando entonces monedas demasiado pequeñas y poco manejables. Por ello se han utilizado también otros metales, mucho más corrientes, pero que permiten fabricar cómodamente piezas de escaso valor. Dentro de este grupo habría que citar fundamentalmente cobre, estaño, zinc, plomo, níquel, aluminio e incluso hierro, puros o aleados entre sí. Hasta el siglo XX, salvo en la moneda noble, prácticamente todas las aleaciones utilizadas han estado basadas en el cobre. Principalmente se ha hecho uso de cobre-estaño (bronce), cobre-zinc (latón) y cobre-estaño-plomo (genéricamente bronce plomado). También se ha utilizado el cobre para rebajar la cantidad de metal noble utilizada en la moneda, por ejemplo los vellones, aleaciones plata-cobre (Cebrián, 2007: 105-106). Aunque no sean propiamente aleaciones numismáticas, no deja de ser del mayor interés hacer un breve comentario sobre los metales utilizados para la fabricación de cuños. Históricamente se han hecho de bronce con un alto porcentaje de estaño, alrededor de un 15%, y tratados térmicamente para endurecerlos. No obstante, existe evidencia de que también se han utilizado cuños de hierro muy bajo en carbono, para trabajarlo con facilidad, carburizado posteriormente para endurecerlo transformándolo en acero

(Tylecote, 1986: 287). Resulta no obstante significativo encontrar en la Península Ibérica un cuño fabricado en un bronce bastante plomado (Cu: 79.55%, Sn: 6.12%, Pb: 13.89%). Se trata de un cuño para moneda ebusitana (Alfaro, 1999: 189). En este caso, la presencia de una cantidad tan alta de plomo, que empeora las características mecánicas de la aleación, no parece haber sido preocupante, habida cuenta de la pésima calidad de las aleaciones ebusitanas, desde el punto de vista metalúrgico (Alfaro, 1999: 191).

Esta aparentemente restringida variedad de aleaciones no debe enmascarar un hecho indudable. Nuestros antepasados han dominado la metalurgia hasta extremos en ocasiones insospechados. Ya en el siglo VI a.C. el hombre había aprendido la compleja química de la separación del oro y la plata combinados en el electrum, mediante la cementación con sal común (Ramage y Craddock, 2000: 200-211). Resulta también sorprendente constatar la selección de aleaciones buscando propiedades mecánicas sutilmente diferentes en los puentes y agujas de las fibulas en época romana, más rígidas en los primeros y más flexibles en las últimas para facilitar el cierre (Bayley y Butcher, 2004: 208-214). El procesado del hierro no es menos meritorio, con la dificultad añadida en este caso de que tanto su obtención, como su procesado, se realizaron siempre en estado sólido al carecer la tecnología necesaria para fundirlo hasta época relativamente reciente (Tylecote, 1987: 151). La metalurgia de los latones también resulta fascinante. A pesar del extenso uso de los mismos, en Occidente no se obtuvo zinc metálico hasta cuando menos el siglo XVIII, por una particularidad de este metal: la temperatura necesaria para reducirlo con carbón de sus menas, es superior a su temperatura de ebullición. Es decir, el zinc se obtiene como vapor metálico que hay que condensar rápidamente para evitar su reoxidación (Tylecote, 1987: 143-144). Para solventar este problema, desde la Antigüedad se obtuvo directamente el latón mediante cementación del cobre con calamina (una asociación natural de minerales de zinc, principalmente hemimorfita), en crisoles adecuados. El proceso y los materiales utilizados, están excelentemente descritos en Martín-Torres y Rehren (2002).

Composición y orden interno de los metales

Uno de los principales problemas del estudio de aleaciones monetales surge de la propia naturaleza de los metales. Aunque a simple vista parezcan homogéneos, microscópicamente están formados por un agregado de cristales metálicos. La forma y composición de estos cristales depende tanto de la composición

global de la aleación (es decir, de la proporción de metales puros utilizada), como de los tratamientos térmicos y mecánicos a los que ha sido sometida ésta. Frecuentemente, los elementos químicos no son solubles unos en otros en estado sólido, por lo que al solidificar un metal a partir de un fundido, se separan del mismo cristales de diferente composición. Para comprender esto, es preciso recurrir a los diagramas de fases. Uno de los ejemplos más ilustrativos para la numismática probablemente sea el del sistema Ag-Cu, representado esquemáticamente en la figura 1. En el mismo, se indica como ejemplo las transformaciones que sufriría una hipotética aleación 30% Ag – 70% Cu. A una temperatura de 1000°C (punto A), la aleación estaría completamente fundida. Si bajase lentamente la temperatura hasta los 900°C (punto B) se formarían en el seno del líquido cristales con un contenido en cobre de aproximadamente un 93%. Como se separan cristales muy ricos en cobre, el contenido del líquido en este elemento bajaría hasta un 55% (es decir, se enriquecería en plata, el elemento que funde a menor temperatura). Si bajase la temperatura todavía más, hasta unos 500°C, la aleación solidificaría completamente, y se formaría una mezcla de cristales muy ricos en cobre (fase β), y otros muy ricos en plata (fase α), puesto que estos metales son prácticamente insolubles mutuamente en estado sólido. Evidentemente la situación real es más compleja del ejemplo aquí descrito y trasciende de los límites razonables para este trabajo. Para profundizar en esta cuestión, como paso previo a sus implicaciones microestructurales, es preciso recurrir a bibliografía más específica sobre metalurgia. No obstante, por el nivel que presentan para el neófito, y particularmente su enfoque referido a materiales arqueológicos, son recomendables los trabajos de Rovira y Gómez (2003: 11-42) y especialmente el de Scott (1991: 11-24). Afortunadamente, el abanico de materiales de interés en numismática es relativamente reducido, y muy bien conocido. Existen numerosas fuentes para consultar diagramas de fases, pues suelen constituir un apéndice casi obligado de muchos textos de metalurgia y metalografía. La selección de mayor utilidad vuelve a estar en la monografía de Scott (1991: 122-136).

A la vista de lo expuesto, determinar la *composición* de una aleación no es un problema trivial, puesto que la palabra puede resultar ambigua. A la vista de lo expuesto, se pone de manifiesto que la palabra composición puede referirse los elementos químicos forman una determinada aleación, y en qué proporciones, pero puede también referirse a cómo se reparten estos elementos formando cristales, es decir, qué fases hay presentes, y en qué proporción. En función de qué información sea la que se precise obtener, las estrategias y técnicas a aplicar son diferentes. En el primer caso, y por el uso que se hará en el resto del texto,

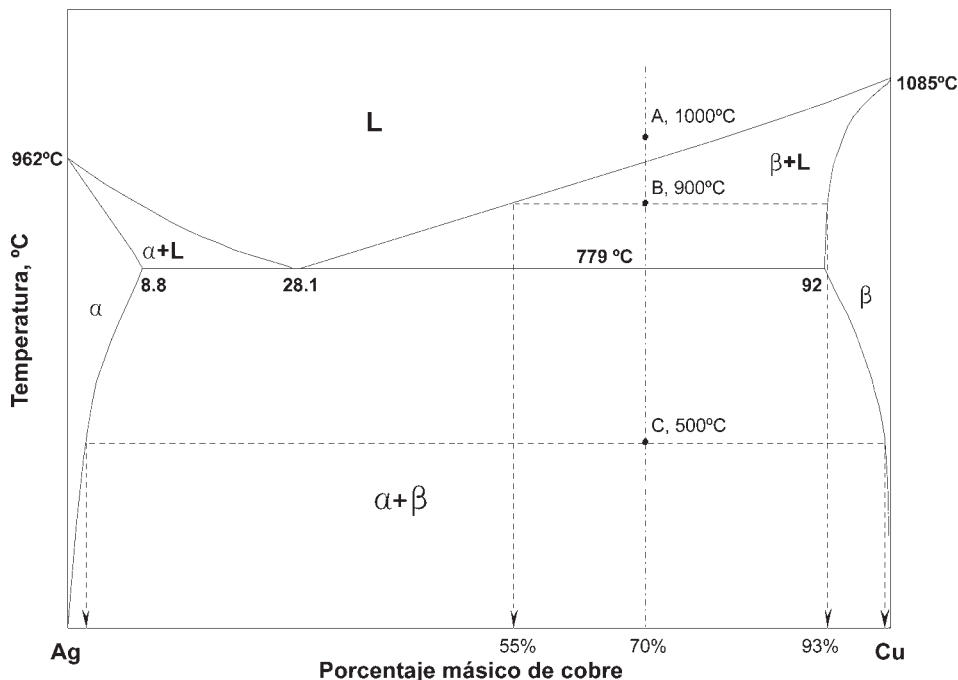


Figura 1. Diagrama de fases del sistema Ag-Cu, con un ejemplo de uso.

es interesante aclarar previamente algunas definiciones. Un componente mayoritario es aquel que está presente en una cantidad superior al 1% del total. Un componente minoritario es el presente en una cantidad entre 0.1-1%. Un componente traza es el presente en una cantidad inferior a 0.1% (Goffer, 2007: 27-28).

Antes de pasar a técnicas más complejas, es conveniente un repaso de las más elementales de todas. Para responder a algunas preguntas pueden ser suficientes.

El primer examen de cualquier material es siempre visual, al ojo desnudo. Ello ya permite diferenciar, por ejemplo, una moneda de oro de una de plata, o de cobre. Sin embargo, si los metales están aleados, es posible que no se pueda distinguir de visu una moneda de plata pura de otra que lleve, por ejemplo, un 7.5% de cobre (plata de 925 milésimas). Este concepto, de gran importancia en las técnicas analíticas, se denomina *sensibilidad* de la técnica. Puede, por tanto, decirse que el ojo humano presenta poca sensibilidad analítica en este caso. Es fácilmente comprensible entonces la necesidad de técnicas más sofisticadas, que permitan afinar más.

Estereomicroscopio y balanza hidrostática: El ABC del analista

El primer paso recomendable en todo estudio numismático es la observación de los ejemplares mediante un instrumento que potencie la capacidad del ojo desnudo. Inicialmente puede recurrirse a lupas y cuentahílos, o a un triplete. Todos estos son instrumentos sencillos, y normalmente baratos, pero presentan una misma limitación. La profundidad de campo suele ser reducida, salvo en instrumentos de mayor calidad, como los tripletes. No obstante, son la pérdida de libertad de movimientos y la falta de tridimensionalidad de la imagen los principales hándicaps de los mismos. Mucho más recomendable es, en cambio, el empleo de un estereomicroscopio, o lupa binocular. Este instrumento permite observar los objetos aumentados, manteniendo la sensación de relieve original de los mismos. Presenta una profundidad de campo más que aceptable, manteniendo además ambas manos libres, lo cual supone una gran ventaja, por ejemplo, para acometer tareas de micro limpieza. A pesar de la sencillez del instrumento, un observador entrenado es capaz de detectar anomalías y/o manipulaciones de la pieza en estudio. Posiblemente la mayor aplicación en la actualidad sea la detección de falsificaciones (Prokopov y Paunov, 2004). Mediante el acoplamiento de una cámara, bien en un tercer ocular al efecto, o bien mediante un adaptador de digiscoping, se pueden registrar fotográficamente las observaciones. Así, por citar tan sólo un par de casos, pueden detectarse restos de la pieza soporte utilizada en una reaunción, defectos en la lámina de plata que envuelve un denario forrado (figura 2), e incluso la granulosidad en el campo característica de una falsificación por microfusión¹ (figura 3). Debido a su relativamente bajo costo, es el primer instrumento que debería utilizar todo investigador. A pesar de elevar su precio, es preferible optar por un instrumento con objetivo de zoom continuo, en vez de escoger uno fijo, o intercambiable de revólver.

Cuando la pregunta a responder pasa necesariamente por la determinación de la composición, incluso así en algún caso puede no ser necesario recurrir a técnicas sofisticadas y costosas. En el caso más sencillo e ideal posible, se trata-

¹ En este procedimiento, se reproduce la moneda mediante un molde, normalmente de goma, con el que se producen réplicas de cera, en positivo. A partir de éstas, se produce un nuevo molde de escayola o similar, en negativo, que se rellena con plata fundida en una centrifugadora. Así se obtienen réplicas muy detalladas, pero que no han sido sometidas a un proceso de acuñación como la moneda original. La diferencia principal entre una moneda original y una réplica de este tipo se encuentra principalmente en su microestructura, como se verá *infra*.

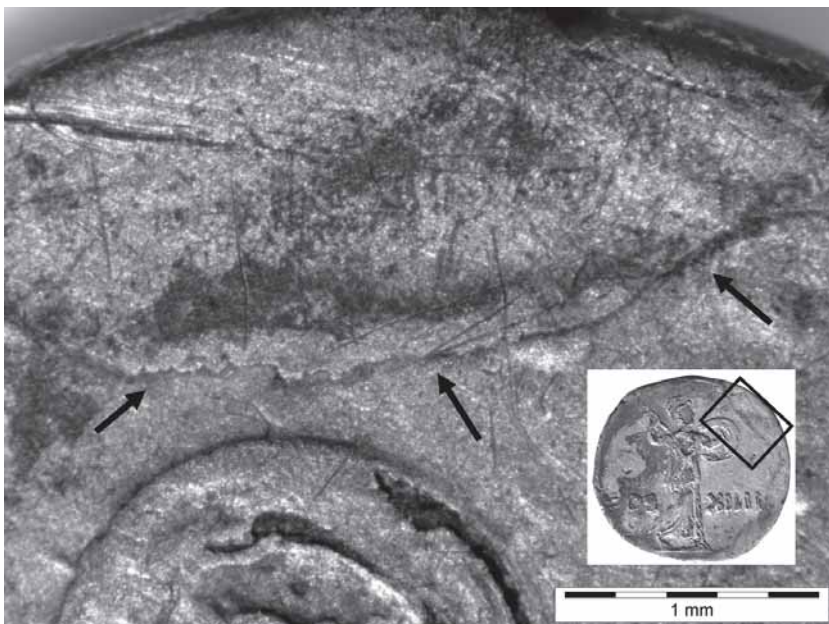


Figura 2. Defectos en la envoltura argéntea de un denario forrado de Domiciano.

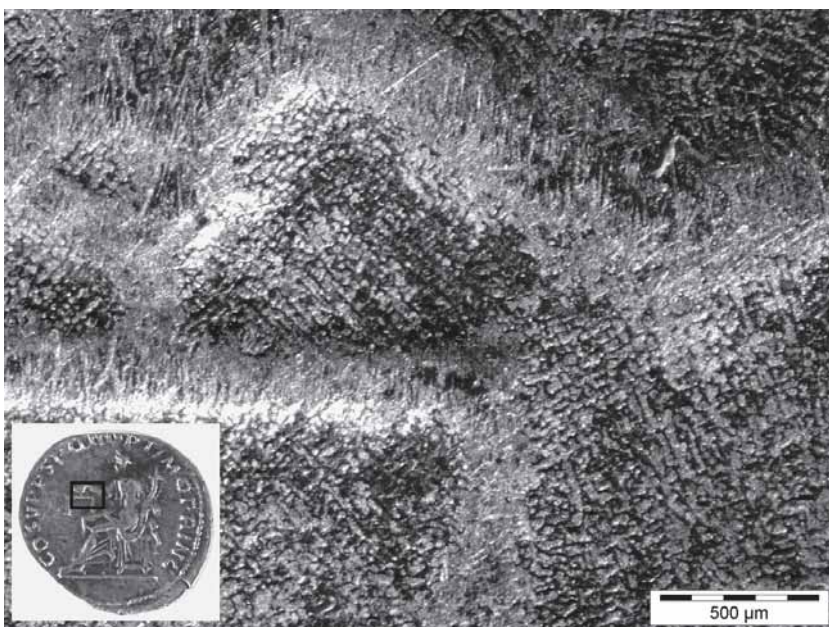


Figura 3. Granulado dendrítico en una falsificación por microfundición.

ría de determinar la composición de una aleación binaria de componentes conocidos, por ejemplo, determinar la cantidad de plata presente en un vellón, o si una determinada pieza argéntea es forrada o maciza. En estos casos puede utilizarse con ventaja un instrumento fundamentado en el principio de Arquímedes, la balanza hidrostática. Mediante este aparato es posible determinar el peso específico, o densidad relativa, de una moneda u otro objeto². Este tipo de mediciones tiene gran utilidad en otras áreas como la Gemología, por cuanto la densidad de los minerales, particularmente las gemas, es bastante constante (Hurlbut y Kammerling, 1993: 58-63). En el caso de una aleación, la densidad es aproximadamente función de la densidad de los metales que la componen, según una relación aproximadamente lineal en el caso de aleaciones binarias. La presencia significativa de más de dos metales conduce a un problema matemático que no se puede resolver. Por tanto, esta técnica está limitada a monedas de aleaciones binarias, lo que excluye también el análisis de piezas con adherencias superficiales, como son las pátinas. No es casual entonces que su principal aplicación sea la detección de monedas forradas, y el estudio de monedas de vellón, o de *electrum* (oro-plata).

Este sencillo aparato no es sino una modificación de la balanza tradicional para que puedan pesarse objetos tanto en el aire, como sumergidos en agua (figura 4). Si se dispone de una balanza con una precisión mínima de 0.01 g, con un poco de ingenio es muy fácil la construcción de un kit doméstico con el que adaptarla para realizar determinaciones de densidades relativas. El autor de estas líneas ha realizado una batería de pruebas con una balanza hidrostática de precisión de la casa Mettler Toledo y un kit construido por él mismo para adaptar una de bolsillo. De los resultados obtenidos se puede concluir que las desviaciones entre las determinaciones obtenidas por ambos instrumentos para una serie de gemas y monedas son en promedio inferiores al 2% para objetos de masa superior a 5 ct (1 gramo). Esta precisión es más que suficiente para el estudio de material numismático. No obstante, para que los datos resulten comparables, es importante estandarizar las medidas utilizando agua destilada como líquido de inmersión, y hacer siempre las medidas a temperatura similar, ya que la densidad depende de este factor.

² Realmente, aunque esté consagrada por el uso, la denominación peso específico es incorrecta. El adjetivo *específico* se reserva para magnitudes *por unidad de masa*, mientras que aquí se refiere a la unidad de volumen. Iguales comentarios pueden hacerse a la denominación anglosajona *specific gravity*, expresión horriblemente traducida en algunos textos como *gravedad específica*.

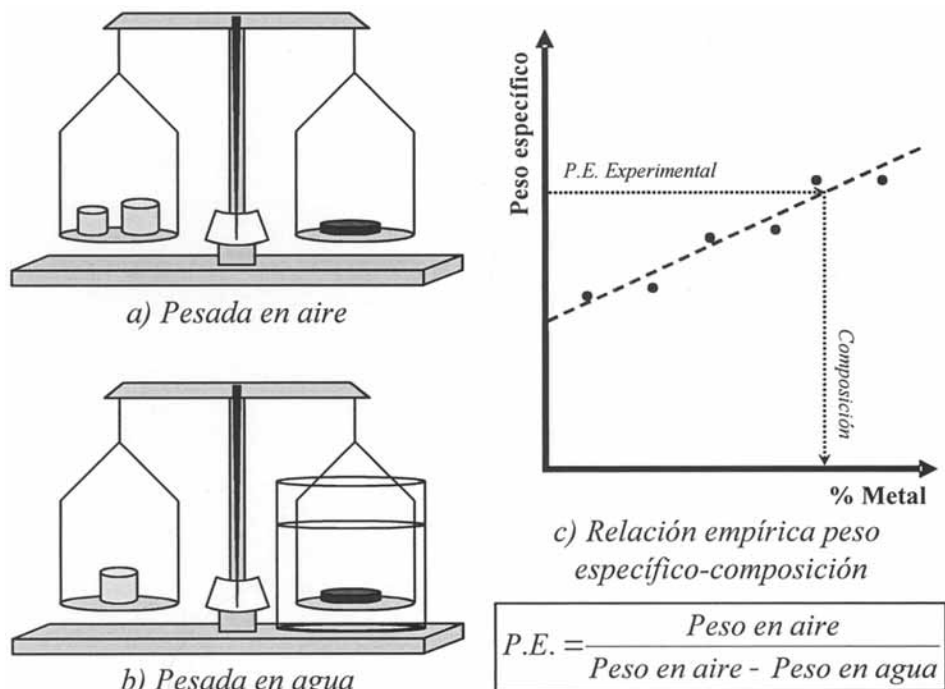


Figura 4. Esquema de balanza hidrostática y su utilización.

Metalografía: visualización de la microestructura

En la bibliografía arqueométrica española, especialmente en la referida a materiales numismáticos, existe cierta confusión en el uso de los términos *metalografía* y especialmente *análisis metalográfico* en sustitución de *análisis químico* o *análisis elemental*, quizá pretendiendo indicar que se refiere al análisis de metales. Este uso indiferenciado es completamente incorrecto. Para clarificar esta cuestión, una excelente definición del término es la que da La Niece, indicando que “*Metallography is the scientific study of the internal structure of metals carried out mainly by means of microscopy*” (La Niece, 1998: 114). En efecto, la visualización de la microestructura es inherente a esta técnica. Un análisis de la composición química nos indica qué elementos, fundamentalmente metales, están presentes en la aleación y en qué cantidad. No obstante, los datos de composición global no proporcionan información acerca de cómo se distribuyen estos elementos en la aleación, como se puso de manifiesto anterior-

mente. Un estudio complementario de la microestructura permite obtener muchísima más información, en este caso de naturaleza tecnológica. Los metales son unos materiales sorprendentes: una vez solidificados tienen *memoria* del procesado mecánico y térmico al que han sido sometidos. En el ejemplo indicado en la figura 1, al enfriar lentamente desde el punto A hasta el B comenzarían a formarse cristales ramificados del metal que solidifique antes en esas condiciones. En este caso, serían cristales de la fase β , rica en cobre. El resto del metal solidificaría envolviendo estos cristales ramificados. Precisamente este fenómeno es el que se observa en la superficie de la moneda mostrada en la figura 3. La microestructura de una aleación solidificada de este modo es inconfundible. Si esa pieza metálica fuese martilleada en frío, se deformaría la estructura, que se vería aplastada y estirada. Este tratamiento causa tensiones internas que pueden ser relajadas mediante calentamiento por encima de una temperatura dada, la cual depende de la aleación. Este proceso, denominado *recocido*, produce una transformación de los granos metálicos, adquiriendo éstos una morfología poliédrica que borra todo rastro de los cristales ramificados originales. Sin embargo, la composición global de la aleación no se modifica. Esta secuencia de transformaciones se representa en la figura 5, modificada a partir de los esquemas de Scott (1991: 7). La única forma de revelar este procesado, es el estudio metalográfico. Desafortunadamente, se trata de una técnica destructiva por naturaleza. En aplicaciones ingenieriles es fácil disponer de muestras para su estudio, pero no lo es tanto cuando se trata de materiales con cierto valor histórico. Ha de evaluarse cuidadosamente la relación coste-beneficio que supone el daño, o incluso sacrificio de la muestra.

Para revelar la microestructura, la muestra ha de someterse a una serie de pasos previos de preparación:

- i) Corte de una sección de la muestra. Excepcionalmente, puede estudiarse una zona del canto, si bien lo ideal es un corte diametral de la pieza.
- ii) Embutido de la muestra en un bloque de resina para su mejor manipulación.
- iii) Desbastado y pulido de la pieza, hasta obtener un pulido especular.
- iv) Ataque químico para el revelado de la microestructura.

La última etapa podría considerarse opcional si se va a utilizar un microscopio electrónico en vez de óptico, si bien la experiencia indica que es preferible realizarla de todos modos. Una descripción más exhaustiva del proceso, así como de los materiales y reactivos utilizables, puede encontrarse en cualquier texto

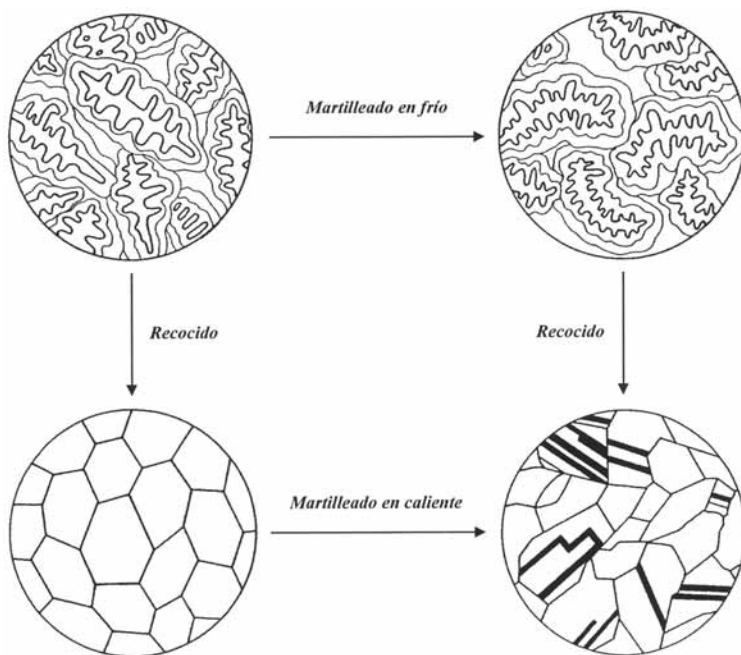


Figura 5. Modificación de la microestructura mediante tratamientos mecánicos y térmicos (modificado de Scott, 1991).

técnico sobre metalografía. Aunque antiguo, resulta muy didáctico el curso práctico de Calvo (1972). Entre los textos más específicos sobre aplicaciones en Arqueometalurgia, son especialmente recomendables la monografía de Scott (1991) y la de Rovira y Gómez (2003).

Como se ha expuesto, la metalografía permite el estudio de cuestiones tecnológicas. Quizá una de las que más interés ha presentado para los estudiosos ha sido determinar la técnica utilizada para la elaboración de monedas forradas. Existen varias posibilidades técnicas: la inmersión de los cospeles de cobre en plata fundida, el calentamiento de un cospel con una mezcla de un fundente y virutas de plata, o envolver el cospel en una lámina de plata entre otras. En cualquier caso, un análisis superficial no resolverá la cuestión, ya que es el estudio de una sección, principalmente en la unión cobre-plata donde se encuentran las diferencias. La Niece (1998: 122-123) indica que posiblemente el uso de láminas de plata fue el primer método, seguido del uso de fundentes algunos siglos después, considerando este último más simple y económico que la inmersión en metal fundido. Por otra parte, el estudio de dos denarios, uno ibérico de

Bolskan y otro republicano de Cn. Lentulus, sirve a Feliú y sus colaboradores para apostar por la inmersión en metal fundido (Feliú *et alii*, 1994a: 29-33), descartando la opción del encapsulado con láminas de plata. Sin embargo, existen evidencias inequívocas de la aplicación de este proceso (precisamente el que evidencia el ejemplar mostrado en la figura 2). Poco tiempo después suavizan esta postura, aunque manteniendo un cierto escepticismo (Feliú *et alii*, 1994b: 32). La cuestión, como se ve, dista de estar resuelta definitivamente, puesto que hay argumentos a favor de las diferentes posibilidades. Lo más probable es que se utilizasen todos los métodos, aunque no se pueda hacer un estudio estadístico de la incidencia de unos y otros sin un amplio programa de muestreo.

Microscopía electrónica de barrido

Dentro de las técnicas analíticas normalmente más accesibles, posiblemente la más versátil sea la microscopía electrónica de barrido (SEM). Hoy en día, la mayor parte de los centros de investigación disponen de por lo menos un microscopio electrónico. En estas líneas no hay espacio, ni tampoco motivo, para hacer una descripción exhaustiva del funcionamiento del SEM y sus posibilidades en el estudio de materiales arqueológicos. Para ello hay muchos y muy buenos trabajos, como por ejemplo los de Feliú (1996) y Sarabia (1998), a los que debe dirigirse el lector interesado. Tampoco falta información detallada en las páginas web de los fabricantes. No obstante, resulta indispensable hacer un par de breves anotaciones generales. La diferencia esencial entre el microscopio óptico y el electrónico es la fuente de iluminación utilizada. En el primer caso, es un rayo de luz, mientras que en el segundo, es un haz de electrones acelerados. Esta diferencia causa que las imágenes tomadas con el microscopio electrónico carezcan de color. El uso de electrones como fuente de iluminación implica, además, que la superficie de la muestra ha de ser conductora de la corriente eléctrica. En el caso de tener metal desnudo en la muestra, esto no supone mayor inconveniente, pero ha de tenerse en consideración en el caso de estudiar metales con pátina o incrustaciones. En estos casos, la superficie ha de volverse conductora mediante un finísimo recubrimiento de grafito o de oro, según el caso en estudio. La interacción de los electrones del haz incidente con los de la muestra, produce diversos fenómenos. Los principales son dos: la emisión de electrones propios de la muestra, denominados *secundarios* (cuya captura produce imágenes en modo SE) y la dispersión cuasi elástica de los propios electrones incidentes, denominados *retrodispersados* (análogamente, produce imágenes

nes en modo BSE). Haciendo un barrido sobre la superficie de la muestra es posible, por tanto, obtener imágenes con información de distinta naturaleza. Con electrones secundarios se obtiene información sobre la topografía de la muestra, mientras que con electrones retrodispersados se obtiene sobre la composición de la superficie. Mientras mayor es el número de electrones de un átomo, mayor es la probabilidad de que otro electrón sea retrodispersado al incidir sobre él. Por este motivo, mientras más brillante sea un punto de la imagen, mayor número atómico tiene en promedio esa zona. Así pueden detectarse heterogeneidades composicionales superficiales. Para comprender mejor esta cuestión, en la figura 6 se representa una zona del reverso de una moneda de vellón de Carlos *el simple* observada en modo SE y en la figura 7 la misma zona, observada en modo BSE³.

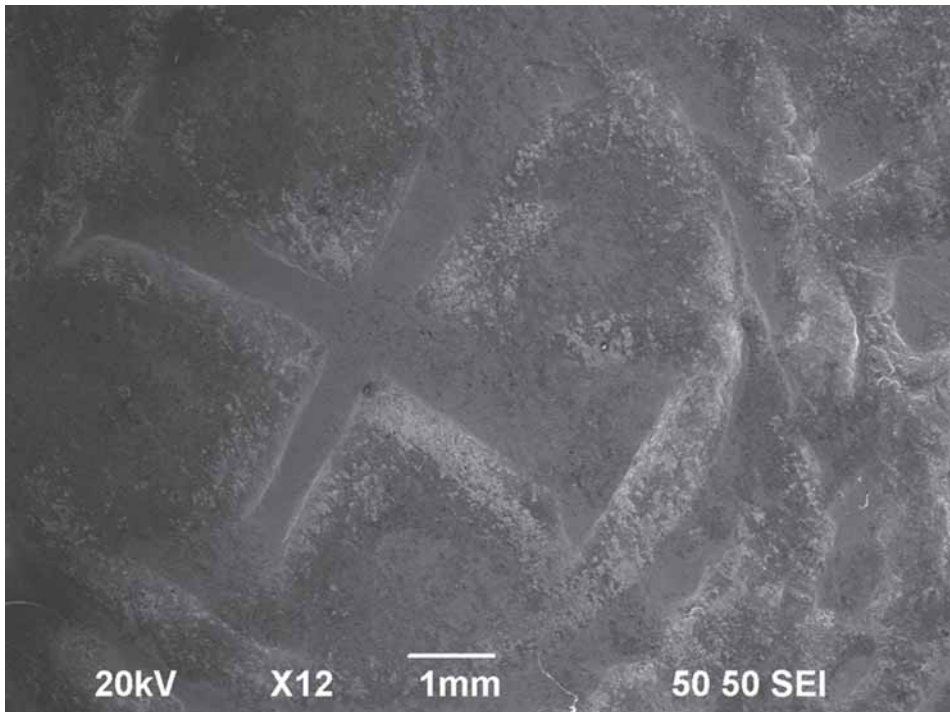


Figura 6. Vellón de Carlos *el simple*, observado en SEM, modo SE.

³ Todas las imágenes de SEM de este trabajo, fueron obtenidas en el microscopio JEOL JSM-6490LV de la Universidad de Málaga. Las condiciones están indicadas en las fotografías en todos los casos.

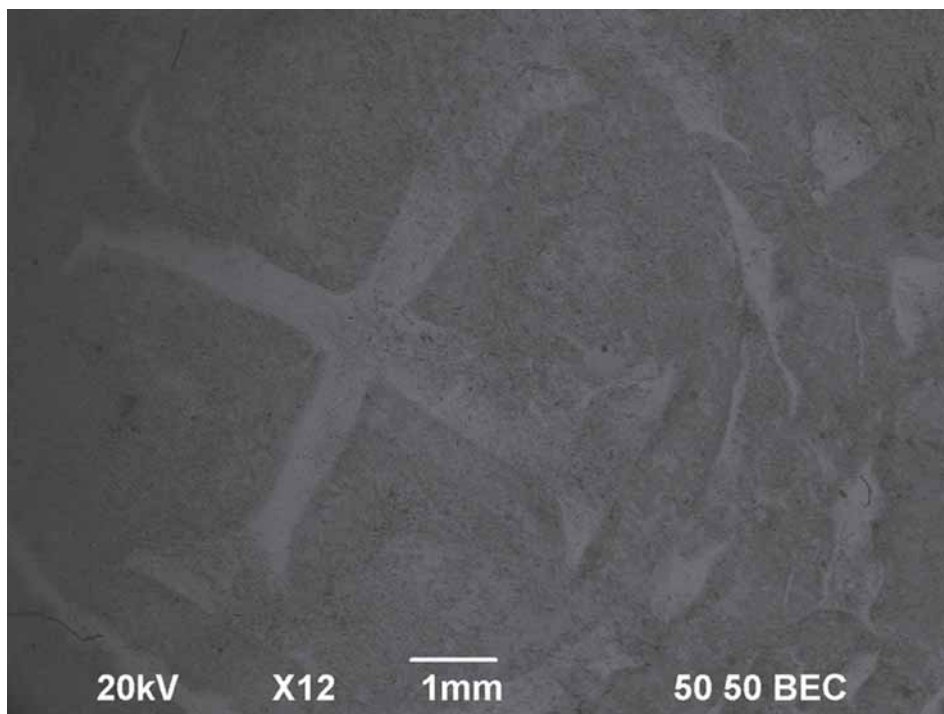


Figura 7. Vellón de Carlos *el simple*, observado en SEM, modo BSE.

En la imagen SE puede observarse la cruz con una mayor sensación de relieve. En cambio, en la imagen BSE puede apreciarse menor diferenciación en el relieve, pero un mayor contraste entre la cruz y el campo. Esto se debe en este caso a diferencias de limpieza entre ambas zonas, como ya se intuía en la primera imagen. Es éste el momento de indicar que la topografía de la superficie influye en la cantidad de electrones que son retrodispersados. Para obtener un máximo rendimiento a las posibilidades que ofrecen las imágenes BSE, debe eliminarse en la medida de lo posible la rugosidad de la superficie. Por tanto, si se pretende conseguir una imagen que represente adecuadamente las diferencias composicionales, las superficies han de estar pulimentadas y perpendiculares al haz de electrones. Así, la forma de sacar el máximo partido al potencial del SEM es el empleo de muestras preparadas para su estudio metalográfico. Sin embargo, como se indicó *supra*, por la particular naturaleza de los estudios numismáticos no siempre se puede disponer de muestras para ello.

El máximo partido de la técnica puede sacarse si el microscopio está equipado con una unidad de microanálisis de rayos-X. Esta ventaja compensa con creces la pérdida de color de las imágenes SEM. Usualmente los detectores acoplados a los microscopios son del tipo EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy). Este tipo de detectores es menos sensible que los del tipo WDX (Wavelength Dispersive X-ray spectroscopy), pero son considerablemente más económicos. Debido a esto, la sensibilidad de los análisis es menor. Típicamente, los límites de detección suelen estar en torno al 0.5-1.0%, dependiendo del elemento y condiciones en las que se realice el análisis. Para obtener mejores resultados, es preciso recurrir a la microsonda electrónica (EPMA), que suele estar equipada con varios detectores WDX. Los resultados son mejores, pero el coste por análisis es muy superior. Normalmente no suele compensar su uso, salvo para la resolución de problemáticas específicas.

Para ilustrar el potencial de esta técnica, se han seleccionado una serie de micrografías. En la figura 8 se muestra una serie de cristalizaciones de productos de corrosión formados en la superficie de uno de los ponderales púnicos hallados en las excavaciones del Museo Picasso de Málaga (Mora, e.p.). El microanálisis de los cristales ha permitido confirmar que se trata de cuprita (Cu_2O). Este mineral suele formarse asociado a los procesos cíclicos de corrosión denominados usualmente enfermedad, o *cáncer*, del bronce (Scott, 1994; Revie, 2000: 732-734). Sorprendentemente, el análisis de una superficie inalterada de esta pieza indicó una presencia minoritaria de cobre en la aleación, compuesta mayoritariamente por plomo y antimonio, así como cierta cantidad de estaño, de cuantificación dudosa debido al gran solapamiento de sus picos con los del antimonio, de presencia indudable (Sb: 51.9%, Pb: 30.1%, Cu: 10.8%, Sn: 7.2%).

En la figura 9 se muestra la superficie de una fractura en un denario de Appius Claudius Pulcher, T. Manlius Mancinus y Q. Urbinus (RRC 299/1b), mostrando los granos poliédricos de plata, como fueron descritos supra. Esta pieza ha sufrido un fenómeno espontáneo de difusión y recristalización que sucede en ocasiones a la plata antigua de alta pureza. En este proceso, las impurezas se concentran en los bordes de los granos, lo que conduce con el tiempo a una debilitación de la pieza, que puede sufrir una rotura frágil ante cualquier impacto. Suele suceder con piezas que tienen una cantidad de cobre entre el 1 y el 10%, u otras impurezas similares. Los análisis indicaron en este caso, que la aleación tiene aproximadamente 96% de plata, y 4% de antimonio, con ausencia de cobre.

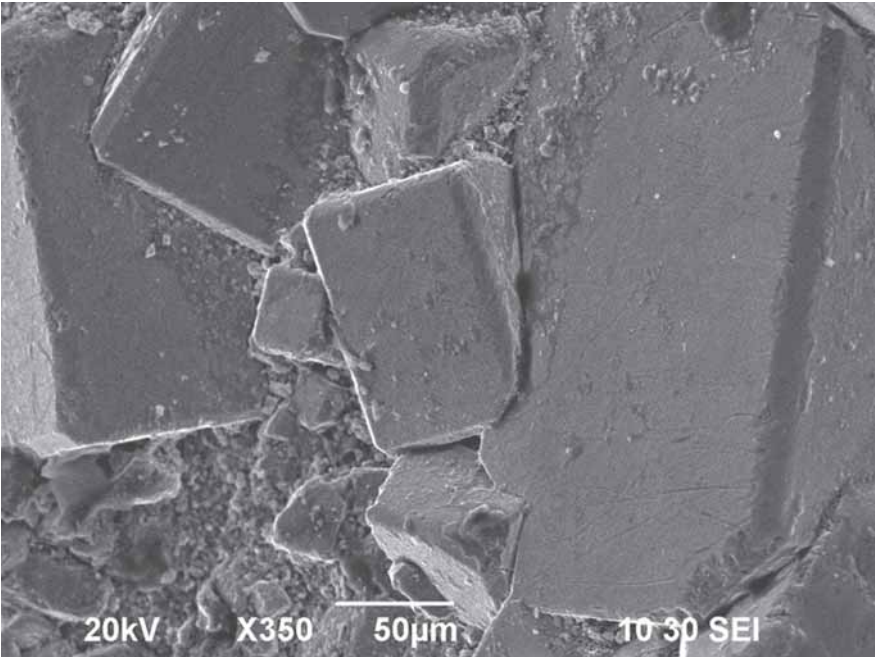


Figura 8. Cristalizaciones de cuprita sobre un ponderal púnico hallado en Málaga.

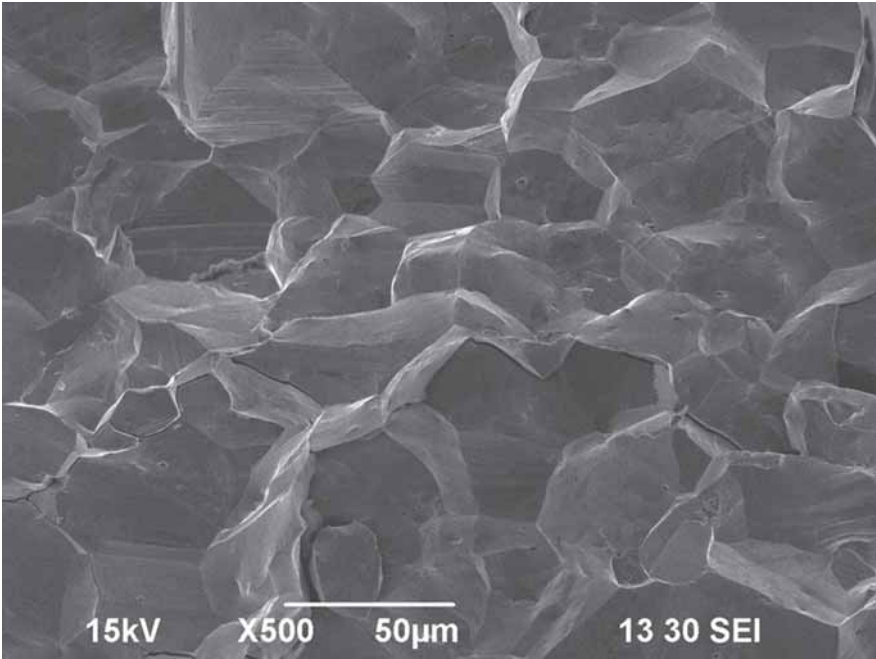


Figura 9. Cristales poliédricos de plata en la fractura frágil de un denario romano.

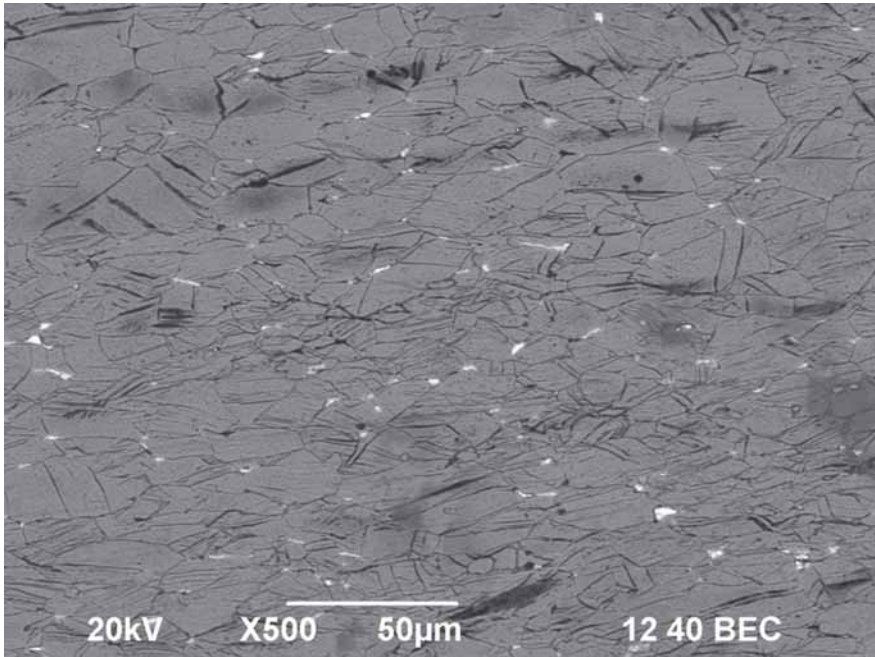


Figura 10. Microestructura de un dirham de la taifa de Málaga.

Como tercer ejemplo, en la figura 10 se muestra, en modo BSE, la microestructura de un fragmento de dirham de vellón de la taifa Hammudí de Málaga. Se trata de una pieza acuñada en Al-Andalus el 443H a nombre de Muhammad al-Mahdí, procedente del tesoro de Ardales (Mora, 1993: 94, n° 428). En la figura se aprecia una microestructura de cristales poliédricos maclados y deformados, evidenciando claramente el proceso de acuñación. El análisis superficial no muestra la presencia de una pequeña cantidad de plomo, que en cambio se aprecia con claridad en la sección, en forma de manchas blancuecinas.

El estudio de la pieza mostrada en la figura 10 ha permitido, además, constatar que se trató de una colada sucia, con impurezas en forma globulillos esféricos cuyo microanálisis ha determinado que se trata de restos de calcosina (Cu_2S). Se trata de impurezas asociadas al proceso metalúrgico de la obtención de cobre a partir de sus menas sulfuradas.

Técnicas espectroscópicas

Existe un amplio abanico de técnicas aplicables para el estudio de la composición elemental de una muestra. Como se ha venido exponiendo, las muestras metálicas son intrínsecamente heterogéneas, su composición varía de un punto a otro. Por tanto, para obtener una composición verdaderamente representativa de la aleación, esto debe ser tenido en cuenta. Si la muestra es sacrificable, aunque esto sea en una minoría de casos, la mejor opción es la disolución de la muestra en una mezcla de ácidos adecuada⁴. Normalmente, puede utilizarse ácido nítrico o agua regia (mezcla de ácidos nítrico y clorhídrico en proporción 1:3). En todo caso, el reactivo adecuado dependerá de la naturaleza de la muestra. Disolver la muestra permite homogeneizar con facilidad, de tal modo que tendremos la verdadera composición promedio. Un conocido aforismo de los químicos reza que “*muestra disuelta, muestra resuelta*”, lo que da una idea de la importancia de esta cuestión. La disolución puede ser analizada por múltiples técnicas. Un posible enfoque es análisis gravimétrico mediante la precipitación selectiva de los diferentes elementos utilizando reactivos específicos. Los distintos sólidos separados pueden ponerse en relación con la composición de la muestra original, con una sensibilidad bastante aceptable, en torno a 0.01%. Esta metodología es, por ejemplo, la que usó el difunto Cope en un amplio programa de análisis de moneda romana, determinando sistemáticamente 9 elementos (Cope *et alii*, 1997: 1-66). Una desventaja de este método es que los elementos analizados se han de seleccionar previamente, por lo que no se pueden detectar los que no se incluyan en la rutina analítica. Esto puede llegar a producir en ocasiones apreciaciones sesgadas. A modo de ejemplo, un estudio del propio Cope de ciertas falsificaciones de dracmas iraníes plateadas mediante amalgamas, no fueron detectadas por él por no incluir el mercurio ente los elementos analizados (Vlachou-Mogire *et alii*, 2007: 560). Para evitar esto, suele recurrirse a las técnicas espectroscópicas, que permiten con mayor facilidad la detección multielemental. Estas técnicas asocian la composición de la muestra con su interacción con el espectro electromagnético. De ellas, quizá las más conocidas por su aplicación a muestras líquidas sean las espectrometrías de absorción atómica (AAS) y de emisión atómica (AES). Esta última es la que en la actualidad parece contar con mayor implantación en los laboratorios

⁴ Por motivos obvios, a este tipo de análisis se le denomina genéricamente como “análisis por vía húmeda”.

arqueométricos (Pollard *et alii*, 2007: 60-61). No obstante, existe una clara preferencia en los estudios numismáticos por las técnicas que analicen las muestras directamente en estado sólido, por la menor intervención que suelen suponer sobre el ejemplar.

Indiscutiblemente, de las técnicas de análisis *directo*, las más utilizadas son las que se basan en la estimulación de la muestra para inducir en la misma la emisión fluorescente de rayos-X⁵. El mecanismo por el que se genera esta emisión se representa en la figura 11. En estado neutro, un átomo de un elemento químico dado tiene un número de electrones que coincide con el número de protones de su núcleo, dispuestos ordenadamente en capas en torno a éste. Cada electrón tiene una energía determinada, característica para ese elemento y la capa en la que está. La energía de las capas externas es mayor que la de las internas. Si algún estímulo consigue arrancar un electrón interno, otro externo vendrá a ocupar su lugar. Para ello ha de desprenderse de una cantidad de energía igual a la diferencia entre los dos niveles, haciéndolo en forma de rayos-X. Como se ha indicado, los niveles de energía son característicos de cada átomo, por lo que es posible aplicar este fenómeno a la identificación y cuantificación de los elementos químicos presentes en una muestra. Las diferencias entre las técnicas se deben fundamentalmente a los métodos utilizados para inducir la emisión de rayos-X y la captación de los mismos para su análisis.

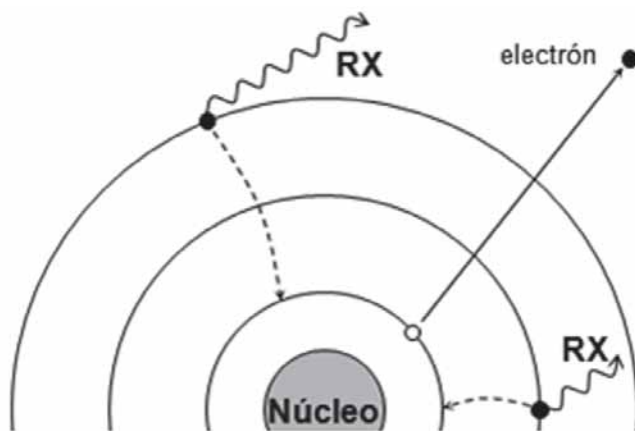


Figura 11. Mecanismo de la fluorescencia de rayos-X.

⁵ Como muestra de la relevancia de estas técnicas, Pollard *et alii* (2007: 118) llegan a titular su capítulo 5.6 como “*A cornucopia of delights – archaeological applications of X-ray analysis*”.

Dentro de este tipo de espectroscopias, la principal es la espectrometría de fluorescencia de rayos-X (XRF), en la que se produce la estimulación de la muestra mediante el uso de un haz de rayos-X. Como se indicó al tratar la microscopía electrónica, existen dos alternativas para la captación de la radiación emitida por la muestra. De este modo se tienen las técnicas EDXRF y WDXRF. Nuevamente, WDXRF presenta mayor resolución y sensibilidad (típicamente del orden de 0.01% para la mayoría de los elementos, hasta un orden de magnitud menor que EDXRF en condiciones óptimas). La versatilidad y relativo bajo coste de esta técnica la hacen una de las más utilizadas en los estudios numismáticos, aunque a la par de SEM-EDX. A pesar de sus numerosas ventajas, ha de tenerse en cuenta que se trata de una técnica de análisis superficial. Los rayos-X emitidos se atenúan con rapidez, por lo que la señal producida en el interior de la muestra no llega al exterior para ser captada por los detectores. Esta atenuación depende de la naturaleza de la muestra, porque la fluorescencia de átomos ligeros es más débil y se atenúa antes que la de los pesados. La penetración en una moneda puede estimarse en promedio en torno a 100 micrómetros (0.1 mm).

Una alternativa al uso de rayos-X para el estímulo de la muestra lo constituye el empleo de partículas. El uso de electrones ha sido tratado anteriormente al describir la microscopía electrónica de barrido y la microsonda electrónica, por lo que no se repetirá. En cambio, resulta del mayor interés tratar la emisión de rayos-X inducida por protones (PIXE). Como se ha indicado, el funcionamiento de la técnica es análogo, salvo en la fuente de estímulo. En este caso se utiliza un haz de protones procedentes de un acelerador de partículas. Los protones son más pesados y se aceleran a mayores energías que los electrones, por lo que sufren una menor pérdida de energía al atravesar la materia. Por este motivo, producen mucho menos ruido de fondo en el espectro de fluorescencia, con lo que se consiguen límites de detección mucho más bajos. Pueden llegar a detectarse niveles tan bajos como 0.0005% (5 ppm). Se trata, pues, de una técnica ideal para el estudio de los elementos traza de una aleación, como se verá posteriormente.

Aparte de las características indicadas, prácticamente ventajas todas ellas, también han de indicarse algunas desventajas de las técnicas basadas en la fluorescencia de rayos-X. La primera y principal, hay que recalcar que consiste en su baja penetración. Todas estas técnicas han de considerarse como técnicas de análisis superficial. Los resultados obtenidos del análisis de una superficie más o menos alterada han de tratarse con precaución. También debe tenerse en cuenta que la mayor parte de las veces, los resultados obtenidos no son cuantitativos,

sino semicuantitativos, debido a la presencia del conjunto de fenómenos conocidos como “*matrix effects*” (Pollard et alii, 2007: 106-107). Esta limitación puede solventarse si se dispone de patrones certificados similares a las muestras a cuantificar. No obstante, trabajar con resultados semicuantitativos no suele dar mal resultado para la comparación entre muestras, manteniendo la condición de que todas hayan sido medidas en las mismas condiciones. Debe hacerse notar que la fluorescencia de rayos-X y técnicas asimilables son poco sensibles al estado de oxidación del elemento, por lo que no pueden informar de si, cuando se detecta cobre en una muestra, se trata de cobre metálico, o de algún compuesto de cobre de la pátina. En ocasiones, diferenciarlos puede ser de la mayor importancia.

Una técnica poco utilizada en estudios numismáticos, pero que tiene gran interés, es la espectroscopía fotoelectrónica de rayos-X (XPS), también conocida como espectroscopía electrónica para análisis químico (ESCA). Esta técnica utiliza un haz de rayos-X para arrancar electrones de la capa de valencia de los átomos de la muestra mediante el denominado efecto fotoeléctrico. La energía cinética de los electrones arrancados depende del átomo del que procede. Mediante esta técnica, es posible detectar cualquier elemento de la tabla periódica, con la excepción del hidrógeno (Hüfner, 1995). La energía necesaria para arrancar estos electrones depende del estado de oxidación del elemento y de su entorno químico, por lo que mediante XPS se puede distinguir si se está analizando metal o pátina.

La principal desventaja de esta técnica lo constituye su bajísima penetración, dado que los electrones emitidos son rápidamente recapturados por la propia muestra. Puede estimarse en la décima parte de la penetración de un análisis por XRF. También son factores a tener en cuenta la disponibilidad de los equipos y el coste por análisis. Suele emplearse para responder a cuestiones muy específicas, en las que el conocimiento preciso de las especies químicas en la superficie es relevante, por ejemplo, en el estudio de los mecanismos de corrosión de una pieza en concreto. Una forma, aunque indirecta, de conseguir mayor penetración la constituye el ataque químico mediante plasma de argón que suele ir acoplado a XPS. Este plasma actúa como *navaja química* permitiendo el ataque progresivo de finísimas capas de átomos, de modo que es fácilmente controlable, e inapreciable a simple vista. A modo de ejemplo, se ha realizado el análisis de la superficie de un tetradracma acuñado en Alejandría a nombre del emperador Diocleciano en el año 289-290 d.C. (Año 6º de su reinado, según el cómputo alejandrino, G-3249). En la figura 12 se representan los

espectros XPS generales⁶, antes y después de un decapado con plasma de argón durante 5 minutos, realizados en las mismas condiciones. La diferencia obtenida con la limpieza es notoria, puesto que se incrementa la escala de intensidades casi en un orden de magnitud, y se detecta Zn, que no aparecía inicialmente. El estudio después del decapado indica que la moneda está compuesta por una aleación de base cobre, muy cargada en plomo y estaño, por lo que corresponde más bien a un potín que a un bronce plomado (Cu: 51.5%, Sn: 26.47%, Pb: 21.37%, Zn: 0.66%). Aunque teóricamente estas piezas deberían llevar un cierto porcentaje de plata, en torno a 1-2%, no ha sido detectado en este ejemplar.

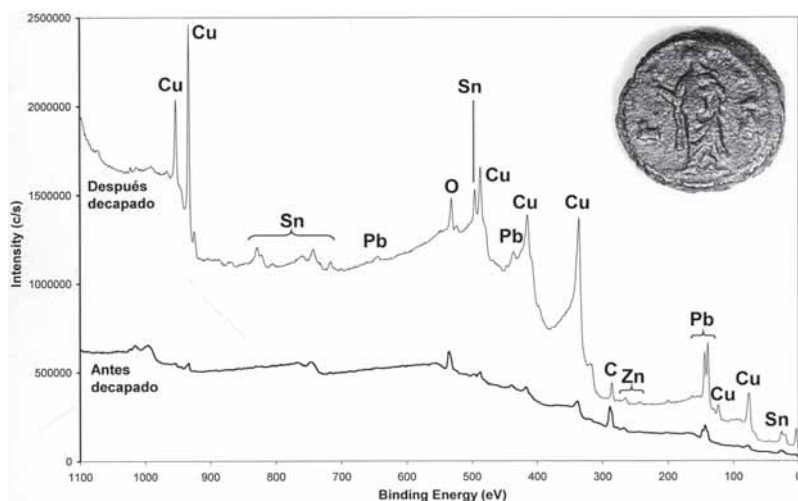


Figura 12. Espectro XPS general del tetradracma antes y después del decapado.

Hasta aquí se ha realizado una exposición de las principales técnicas analíticas aplicadas en los estudios numismáticos. Hay muchas más técnicas, pero por cuestiones de espacio, se han seleccionado las más representativas y relevantes. Hay muchos y muy buenos textos sobre las técnicas analíticas, como el de Holler *et alii* (2000), pero también especialmente aplicadas a la Arqueología, como el ya citado de Pollard *et alii* (2007). Debe hacerse notar, sin embargo, que no todas las técnicas descritas se han aplicado al estudio de moneda gallega, ni las aplicadas lo han sido en la misma medida, como se verá a continuación.

⁶ Se realiza un barrido general sobre el área a analizar para detectar los elementos presentes. Para la cuantificación se realizan espectros de detalle, con mayor resolución, en las regiones de interés del espectro general.

Estudios analíticos sobre moneda gallega

Ya desde la Prehistoria, la riqueza minera de las tierras gallegas ha llamado la atención del hombre. Quizá los metales más destacables del suelo gallego sean el estaño y, sobre todo, el oro, aunque también hay ciertos indicios históricamente explotables de cobre, plata e incluso mercurio (Sánchez, 1989: 27-29 y mapa de indicios minerales). Se han realizado bastantes estudios arqueometalúrgicos sobre la región, aunque en general encaminados a la caracterización piezas de orfebrería, entre ellas bastantes torques.

Moneda Antigua

Los estudios analíticos de moneda gallega en la Antigüedad son bastante limitados. Por una parte, las piezas emitidas en la región se limitan, con ciertas dudas en cuanto al lugar exacto de acuñación, a las monedas de Augusto de la serie de la *caetra*. Aún así, el volumen de análisis realizados es bastante limitado, como se verá.

Burnett *et alii*, para la realización del *Roman Provincial Coinage* (RPC), analizaron tres piezas de la *Caetra* de la colección del British Museum mediante XRF en los laboratorios del mismo. El objetivo de su trabajo fue establecer la naturaleza de las aleaciones para su *corpus*. Por este motivo, las piezas fueron analizadas sin ninguna clase de limpieza o tratamiento, con consciencia de las limitaciones de este proceder (Burnett *et alii*, 1992: xvii y 67-68). Detectaron que se trata de aleaciones ternarias Cu-Sn-Pb. Posteriormente, Vaquer *et alii*, como apéndice al trabajo de Ferrer (1996), analizaron cuatro ejemplares para comparar con dos posibles cospeles aparecidos en dos excavaciones de Lugo capital. La técnica utilizada fue SEM-EDX, realizando una limpieza preliminar mediante ataque con ácidos clorhídrico y nítrico diluidos. Posteriormente, se terminaron la limpieza mediante EDTA y nítrico diluidos. El trabajo incluye una serie de comentarios acerca de la microestructura de la pieza, la presencia de inclusiones carbonosas, indicio todo ello de un estudio metalográfico. Sin embargo, no se indica explícitamente el estudio de una sección pulida, por lo que no se puede hacer ninguna observación al respecto (Vaquer *et alii*, 1996: 444-446). Por su parte, Parrado (1996: 166 y 291-292) estudió ocho ejemplares para su Tesis Doctoral, depositadas en los museos de León y Valladolid. Desafortunadamente, por una errata de imprenta, no es posible saber a qué tipo del RPC corresponden las piezas que incluye, con la salvedad de las que aparecen

fotografiadas. De las que no, tan sólo se puede deducir que corresponden a los tipos RPC3 o RPC4. De las ocho piezas, determinó la densidad relativa en siete casos, mediante la balanza hidrostática. De estas siete piezas, adicionalmente, determinó la composición mediante EDXRF en seis, sin realizar ninguna limpieza previa sobre las mismas. No se hace indicación acerca del estado superficial de las piezas (presencia o no de pátinas y/o incrustaciones significativas), lo cual es fundamental para la comprensión de algunos de los valores obtenidos. Obtiene en dos casos valores de densidad inferiores a 6.5. Puesto que los datos analíticos indican que se trata de aleaciones ternarias Cu-Sn-Pb, se trata de valores anormalmente bajos (la densidad relativa del elemento más ligero, el estaño, ya es superior a 7). Hay que concluir, pues, que se trata en general de piezas bastante incrustadas. Este caso sirve excelentemente para ilustrar las limitaciones del método en el estudio de ejemplares de AE, como la propia autora indica. En el contexto del estudio del abastecimiento de moneda en los campamentos romanos en Hispania, Rovira (2006) analizó mediante SEM-EDX nueve ases de la *Caetra* procedentes de los campamentos romanos de *Lucus Augusti* (Lugo), *Asturica Augusta* (Astorga, León) y *Petavonium* (Rosinos de Vidriales, Zamora). También incluyó en su estudio los posibles cospeles descubiertos en Lugo. Los análisis fueron realizados en todos los casos sin ningún tratamiento preliminar de limpieza de las monedas. Según su signatura arqueológica, una de las piezas de Lugo parece corresponder con una de las analizadas por Vaquer *et alii*, como se verá posteriormente. Se cuenta, por tanto, con 22 análisis elementales, uno de ellos posiblemente duplicado. Puesto que su volumen es relativamente reducido, se recopilan todos en la tabla I, manteniendo en la misma las cifras significativas dadas por cada autor. Para evitar referenciar las piezas mediante su signatura arqueológica, por otra parte no citada de forma homogénea en las correspondientes publicaciones, las piezas de Vaquer *et alii* están referenciadas mediante el número de inventario dado por Ferrer (1996: 426-429), del que los análisis son apéndice. Igualmente, en el caso de las piezas de Rovira, la referencia corresponde al número de inventario dentro de cada campamento (LU=Lucus, AA=Astorga, RV=Rosinos de Vidriales).

De los datos de la tabla I es evidente que las monedas de la *caetra* fueron acuñadas en una aleación Cu-Sn-Pb. En estas aleaciones, suele ser difícil establecer un patrón, puesto que existe una gran región de inmiscibilidad en el estado líquido en su diagrama de fases. El metal fundido se segrega en un líquido rico en plomo, y otro pobre en el mismo. Por este motivo aparecen grandes diferencias entre piezas, e incluso entre puntos de la misma pieza. También debe tenerse en cuenta que las sales de cobre son más solubles que las de zinc, estaño

TÉCNICAS INSTRUMENTALES APLICADAS A LA METALÚRGIA NUMISMÁTICA

Tabla I. Datos analíticos de monedas de la *Caetra* (% peso).

Referencia	Tipo	Cu	Sn	Pb	Fe	Mn	Ni	Zn	As	Sb	Bi	Ag
Burnett <i>et alii</i> (1992: 67-68), XRF sobre pátina												
RPC2 nº 3	RPC2	66.00	2.93	28.82	0.024	-	0.27	0.015	0.040	0.063	0.010	0.009
RPC3 nº 16	RPC3	77.00	2.20	18.51	0.043	-	0.05	0.000	0.008	0.099	0.007	0.029
RPC4 nº 53	RPC4	83.50	4.85	10.91	0.027	-	0.00	0.011	0.034	0.138	0.003	0.008
Vaquer <i>et alii</i> (1996: 444), SEM-EDX eliminando pátina (HCl, HNO ₃ , EDTA)												
49	RPC2	90.3	8.1	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-
39	RPC3	92.7	5.2	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-
18	RPC3	77.8	5.2	17.0	-	-	-	-	-	-	-	-
43*	RPC4	76.6	13.7	9.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Parrado (1998: 166), EDXRF sobre pátina												
749	RPC2	86.59	2.86	8.98	0.46	0.06	0.19	0.85	0.00	0.02	-	-
751	RPC3	95.41	1.36	1.56	0.32	0.09	0.55	0.69	0.00	0.01	-	-
753	RPC4	93.37	1.89	3.68	0.26	0.15	0.14	0.50	0.00	0.01	-	-
752	RPC3/4	91.87	1.63	4.60	0.37	0.08	0.51	0.67	0.25	0.01	-	-
755	RPC3/4	91.23	1.54	5.99	0.29	0.09	0.30	0.54	0.00	0.04	-	-
756	RPC3/4	82.73	3.78	10.49	2.04	0.08	0.36	0.51	0.00	0.02	-	-
Rovira (2006: 609-613), SEM-EDX sobre pátina												
LU36	RPC3	27.0	8.58	64.4	0.00	-	0	0	-	0	-	0
LU48	RPC3	62.8	6.33	30.5	0.42	-	0	0	-	0	-	0
LU49	RPC3	52.1	8.32	39.5	0.00	-	0	0	-	0	-	0
LU52	RPC3	86.3	7.76	5.9	0.00	-	0	0	-	0	-	0
LU53	RPC3	43.8	8.17	47.6	0.35	-	0	0	-	0	-	0
AA26	RPC3	70.8	7.72	21.2	0.27	-	0	0	-	0	-	0
LU69*	RPC4	81.2	8.95	9.4	0.46	-	0	0	-	0	-	0
AA28	RPC4	86.6	4.80	8.6	0.00	-	0	0	-	0	-	0
RV6	RPC4	72.6	8.52	18.9	0.00	-	0	0	-	0	-	0

* Análisis posiblemente repetido

- Elemento no determinado

y plomo, por lo que la pátina se enriquece artificialmente en estos elementos por lixiviado del cobre durante el tiempo que el ejemplar ha estado enterrado (Montero, 2000: 15-17). Como este fenómeno no es cuantificable, no es fácil establecer una correlación directa entre los análisis superficiales de monedas de AE y la composición real de la aleación. Para minimizar en la medida de lo posible las variaciones, es imprescindible realizar estos estudios sobre grandes áreas de secciones pulidas). Salvo los comentarios hechos *supra*, no se ha podido localizar ningún estudio metalográfico de estas emisiones. Con todo, estos datos parecen apuntar a que, analíticamente, las monedas tipo RPC3 son indistinguibles de las RPC4 en cuanto a sus componentes mayoritarios (Rovira, 2006: 617). Para resolver definitivamente esta cuestión sería de gran interés un estudio detallado de suficientes ejemplares de ambos tipos.

En general, la aplicación de la metalografía al estudio de moneda gallega ha tenido un alcance limitado según la bibliografía disponible. Es comprensible que el carácter destructivo de esta metodología de análisis limite su aplicación. En este panorama resulta destacable el estudio metalográfico de una serie de antoninianos romanos procedentes de dos tesorillos hallados en Chantada y Lugo capital (Cavada, 1994: 135-144). Cavada realizó un amplio estudio de ambos tesorillos utilizando diversas técnicas, que define como “análisis metalográfico” y “análisis metalúrgico”⁷. Rigurosamente hablando, en el primer caso se trata de análisis elemental mediante XRF, mientras que en el segundo, a la vista de sus micrografías, parece tratarse de SEM-EDX. En líneas generales, es de gran interés constatar que los análisis de estos tesorillos concuerdan con los obtenidos en otros programas de análisis de moneda romana del mismo periodo, por ejemplo los de Cope *et alii* (1997), por lo que se trata de una aportación peninsular injustamente poco conocida en el extranjero. También debe hacerse notar que este trabajo ve aumentado su valor debido a que sus datos resultan de un gran valor didáctico sobre las metodologías analíticas utilizadas. Por una parte, las micrografías son altamente reveladoras y su estudio es de gran utilidad para quienes se inicien en la metalografía numismática. No resulta fácil encontrar micrografías de monedas en las que se distinga tan claramente un enriquecimiento superficial en plata a costa de la corrosión selectiva del cobre en el caso de las piezas de vellón, o de un baño superficial en plata,

⁷ A pesar de que pueda resultar discutible la nomenclatura, resulta muy útil encontrar en este caso una aclaración: “[...] En el anexo VI hacemos una comparación entre los datos obtenidos por los dos sistemas de análisis metalográficos (por Fluorescencia = metalográfico y Microsonda y Microestructural = metalúrgico) [...]” (Cavada, 1994: 51).

posterior a la acuñación, en el caso de las piezas más tardías. Además, resulta del mayor interés su anexo VI (Cavada, 1994: 121), en el que hace una comparativa de los resultados obtenidos directamente sobre la superficie mediante XRF, y los obtenidos en la sección pulida para el núcleo y la periferia de la pieza. En estos últimos se pone de manifiesto la gran extensión que puede alcanzar el enriquecimiento superficial en plata.

Moneda sueva

No hay demasiados estudios analíticos sobre la moneda sueva, debido principalmente a la propia rareza de la misma. Indiscutiblemente, el mejor trabajo disponible actualmente, tanto por sus aportaciones propias, como por sintetizar los trabajos previos, sigue siendo el de Peixoto y Metcalf (1997: 133-155 y 331-347). Realizaron un estudio mediante PIXE de 92 monedas (2 silicuas, 11 sólidos y 79 trémises), al que incorporaron en sus gráficos los análisis de los trabajos anteriores. Concretamente, incorporaron los realizados por EPMA de 4 trémises del Ashmolean Museum de Oxford, y los de 1 sólido y 7 trémises del Fitzwilliam Museum de Cambridge, realizados mediante determinaciones de densidad. El objetivo propuesto es la determinación de la ley de las piezas, por lo que se centraron en los componentes mayoritarios de las aleaciones (Au-Ag-Cu). En líneas generales, para los sólidos obtuvieron un valor de 93.2% Au, si bien una de las piezas, de menor peso, reduce su ley hasta un 79.6% Au. Para los trémises, las leyes están comprendidas entre 80-90% Au para la mayor parte de las series, si bien resulta interesante constatar que dos de las emisiones presentan valores promedio superiores al 90%, mientras que la serie LATINA MVNITA presenta una ley sensiblemente inferior, comprendida entre 70-80% Au para la mayoría de los ejemplares. La poca incidencia de la presencia de Cu en los análisis realizados por PIXE (inferior al 1% en la mayoría de los ejemplares), permite comprobar que los errores de los resultados obtenidos mediante la determinación de densidades son bastante precisos. No obstante, mediante el uso de esta técnica son esperables, en promedio, valores reales de aproximadamente un 3% Au menos que los medidos por otras técnicas (Peixoto y Metcalf, 1997: 134-135). Los análisis de silicuas, tan sólo dos ejemplares, son insuficientes para mostrar cualquier tendencia con un mínimo de fiabilidad estadística, pero parecen indicar en todo caso que el contenido en plata de las mismas es muy alto (>95% Ag). Otra aportación significativa, por el enfoque diferente que presenta, la constituye el trabajo de Guerra (2000). Aparte del análisis de los

componentes mayoritarios de las aleaciones, determina las trazas de cinco monedas suevas de oro mediante PAA (Proton Activation Analysis). Las conclusiones de su comparativa con trémises visigodos y dinares omeyas andalusíes son sumamente interesantes. En el caso de las monedas suevas parecen distinguirse dos grupos aunque desafortunadamente sea muy reducido el número de piezas analizadas para poder confirmarlo (Guerra, 2000: 243). En un trabajo posterior, esta misma autora prosiguió su línea de investigación para ofrecer una panorámica de la circulación del oro monetario en Portugal desde la llegada de los suevos hasta el siglo XX (Guerra, 2004). A la vista de sus productivos resultados, sería deseable la realización de un estudio análogo para el área española.

Moneda Visigoda

La moneda visigoda ha recibido mayor atención por parte de los investigadores que la moneda sueva. A esto evidentemente contribuye su mayor número relativo, así como los interrogantes que plantean ciertas cuestiones, como son la existencia de un elevado número de cecas en la *Gallaecia*, con un sorprendentemente reducido volumen de emisión (Metcalf, 2000). Dentro de estos estudios, el número de ejemplares de cecas galaicas es minoritario, como cabe esperar por su rareza. Lógicamente, es más fácil llegar a conclusiones fiables sobre cecas que acuñaron masivamente como son *Toleto* o *Emerita*. Los principales estudios analíticos realizados sobre moneda visigoda son los de Gomes *et alii* (1995: 119-200), quienes estudiaron 238 trémises mediante XRF; Guerra (2000), que estudió 46 trémises mediante PAA; Canto *et alii* (2002: 77-82), quienes estudiaron 69 ejemplares mediante SEM-EDX y Vico *et alii* (2006: 96-108), quienes realizaron análisis por SEM-EDX de 331 piezas, si bien no llegaron a publicar completamente los resultados⁸. Por su parte, Pliego (2009: 210-213) recopila los análisis realizados con anterioridad para estudiar la evolución

⁸ Su trabajo incluye una serie de gráficos mostrando la evolución de los contenidos en Au y Ag, así como interesantes comentarios sobre los mismos. Sin embargo, no han incluido las tablas correspondientes con sus resultados analíticos, por lo que es imposible hacerse una idea de la validez estadística de los resultados. Tampoco detallaron la distribución de la muestra por lo que, por ejemplo, no puede saberse cuántos ejemplares de piezas acuñadas en la *Gallaecia* estudiaron, ni tampoco de qué cecas. Es sumamente deseable que realicen una publicación extensa de sus datos y conclusiones, ya que no en vano es el mayor conjunto estudiado de moneda visigoda.

Tabla II. Datos analíticos de moneda visigoda acuñada en cecas galaicas (% peso).

Ref.	Monarca	Ceca	Au	Ag	Cu	Fe
<i>Gomes et alii</i> (1995: 151-170), XRF						
32	Recaredo I	Portocale	77.0	21.9	1.1	-
38	Liuva II	Portocale	77.3	21.6	1.1	-
56	Witerico	Laetera	85.4	13.8	0.8	-
57	Witerico	Tude	77.5	21.1	1.4	-
66	Gundemaro	Nandolas	76.7	22.8	0.5	-
133	Suintila	Bracara	64.6	34.4	0.9	-
155	Chintila	Bracara	72.0	27.1	0.9	-
<i>Guerra</i> (2000: 249-250), PAA						
R 1	Recaredo I	Portocale	59.2	37.3	3.1	0.04
R 2	Recaredo I	Bracara	73.8	24.0	1.9	0.10
BN 31 bis	Recaredo I	Pincia	69.8	27.7	2.4	0.01
S 2	Sisebuto	Bracara	68.9	29.6	0.8	0.04
S 8	Sisebuto	Nandolas	72.4	24.9	2.6	0.08
Sv 4	Suintila	Portocale	69.2	28.2	2.3	0.08
Sv 5	Suintila	Bracara	67.7	29.0	1.9	0.05
Sv 6	Suintila	Cepis	73.4	25.0	1.4	0.09
Sv 7	Suintila	Turiviana	82.3	14.6	2.6	0.07
<i>Canto et alii</i> (2002: 80-82), SEM-EDX						
20	Witerico	Laurucló	75.52	21.17	2.22	1.09
29	Suintila	Ventosa	69.52	26.81	2.03	1.64
38	Tulga	Laetera	60.01	36.33	2.50	1.16
42	Chindasvinto	Asturie	54.47	40.73	3.67	1.14
43	Chindasvinto	Aurense	54.77	40.87	2.68	1.68
44	Chindasvinto	Calapa	60.98	36.21	1.89	0.93
45	Chindasvinto	Fraucello	58.81	37.01	2.42	1.75
46	Chindasvinto	Lucu	63.68	31.80	2.61	1.92
47	Chindasvinto	Petra	67.39	29.66	2.03	0.92
48	Chindasvinto	Tude	71.83	26.57	1.13	0.47

- Elemento no determinado

del contenido en oro de las piezas, en conjunción con la evolución de metrológica de las mismas. Es destacable la agudeza con la que detecta la problemática del análisis de piezas procedentes del comercio numismático y por ende de colecciones particulares, debido a la limpieza a la que han sido sometidas, como se expondrá *infra*. De los 353 análisis publicados, tan sólo 26 corresponden a piezas galaicas, apenas el 7.4%. Es difícil aventurar nada con tan pocos análisis y tan heterogéneos en cuanto a reinados, cecas e incluso metodologías analíticas, por lo que resulta preferible optar simplemente por recopilarlos todos en una tabla única. En la misma, tabla II, se excluyen todos los elementos traza detectados por Guerra, con la excepción de Fe, también determinado por Canto *et alii*. Se ha mantenido exactamente el mismo número de cifras significativas indicado por los autores.

La diferencia quizá más significativa se encuentre entre los niveles de Fe detectados por Guerra y los de Canto *et alii*. Tratándose de monedas principalmente de oro, el hierro detectado es prácticamente seguro que esté depositado en la superficie mediante un proceso natural de rubefacción, análogo al documentado en pepitas de oro, puesto que porcentajes altos no son comprensibles en estas aleaciones. En consecuencia, la diferencia observada se debe con bastante probabilidad a la diferente penetración de ambos métodos en la pieza, de tal suerte que PAA irradia un mayor volumen de metal de la moneda, mientras que SEM-EDX, con menor penetración, detecta en mayor medida la *pátina* de las mismas. Este ejemplo sirve para demostrar que los análisis realizados con diferentes técnicas analíticas han de ser comparados con suma cautela, sobre todo si se pretende combinar datos de diferentes trabajos para la realización de estudios estadísticos. En este sentido, debe ser tenida en cuenta la advertencia en contra de la validez estadística de este tipo de estudios dada por Montero *et alii* (2007: 36).

Moneda medieval cristiana

Los estudios de la amonedación medieval cristiana parten de la dificultad que presenta la propia comprensión de la misma, en la cual todavía hay muchas dudas en algunos periodos. En consecuencia, los estudios analíticos realizados sobre la misma llevan cierto retraso, en comparación con los realizados sobre otros periodos históricos. Ocupándose de moneda gallega, puede citarse como ejemplo interesante el estudio de dos vellones de Alfonso IX, uno de ellos de

Santiago de Compostela, realizado por Orol (1982: 89-92). Determinó que se trata de vellones con la superficie blanqueada a posteriori de la acuñación para aparentar mayor ley. Aunque no justificó de forma explícita en qué se basó, parece deberse a que la microestructura de la capa superficial de plata no esté deformada plásticamente. Desafortunadamente las micrografías que acompañan al texto no están hechas a suficiente aumento para poder constatar esta circunstancia. En el mismo trabajo, el autor también realizó un interesante estudio analítico de una serie de vellones, pero desafortunadamente no llega a indicar siquiera la técnica utilizada, por lo que no resultan de demasiada utilidad. En fecha muy reciente, se ha publicado una amplia revisión analítica de la moneda medieval cristiana (Roma y Guitián, 2010), por lo que aquí principalmente se expondrán algunos comentarios generales. Aparte de la recopilación de los datos bibliográficos previos, los autores añaden un importante conjunto de análisis realizados mediante SEM-EDX. Para la consulta de los datos analíticos, por la gran extensión de los mismos, se remite al lector al citado trabajo. Presenta una interesante novedad en cuanto al tratamiento de los resultados, puesto que se centra en el estudio de los elementos minoritarios y traza. Expresan la composición mediante ratios inversos, es decir, mediante cocientes entre un elemento mayoritario de referencia y el minoritario o traza correspondiente. En general, en los análisis semicuantitativos los elementos analizados suman 100%, por lo que los porcentajes de los elementos presentes en menor cantidad pueden depender considerablemente del número total de elementos analizados. Así por ejemplo, en la tabla I no son comparables los valores de hierro obtenidos por Burnett *et alii*, Parrado y Rovira, puesto que analizaron conjuntos de elementos muy diferentes. La principal ventaja de usar ratios consiste en que el cociente hace comparables resultados aunque se tomen sobre diferentes conjuntos de elementos, porque la relación entre ellos permanece constante. Como desventaja debe citarse que en que estos cocientes son muy sensibles a los errores en la determinación de las trazas, que son tanto mayores cuanto más cerca se esté de los límites de detección de la técnica utilizada. Volviendo al trabajo de Roma y Guitián, los planteamientos desarrollados son de gran interés, si bien el número de análisis sigue siendo muy reducido, habida cuenta del amplio periodo histórico que abarca, y del gran número de emisiones comprendido en el mismo. Es de desear que los autores prosigan su trabajo en esta interesante línea para resolver ciertas cuestiones que ya se vislumbran, pero que aún no están claras del todo.

Conclusión

En las líneas precedentes se ha expuesto una somera revisión de las principales técnicas analíticas de aplicación a la numismática, así como de algunas cuestiones sobre las los análisis pueden arrojar algo de luz. Muestra de ello son los diferentes estudios mencionados sobre moneda gallega de diferentes épocas. Para cerrar esta contribución, dado que en un trabajo general de revisión resulta algo difícil establecer unas conclusiones concretas, ya sean éstas cerradas o generales, parece preferible realizar una recapitulación con alguna reflexión sobre las cuestiones tratadas.

Para la planificación de cualquier estudio analítico, debe plantearse previamente la cuestión o cuestiones que pretenden clarificarse. No es posible insistir demasiado en este punto, puesto que la metodología analítica idónea dependerá de qué información se pretenda obtener. A modo de guía preliminar, en la tabla III se realiza una comparativa entre las diferentes técnicas mencionadas en este trabajo, incluyendo en la misma su coste relativo.

Tabla III. Comparativa de las técnicas descritas.

Técnica	Carácter	Estructura	Mayoritarios	Trazas	Coste
Estereomicroscopio	No destructivo	Según muestra	-	-	Bajo
Balanza hidrostática	No destructivo	-	Si, en aleaciones binarias	-	Bajo
Metalografía	Destructivo	Muy adecuada	Aproximada, a través del estudio de fases	-	Medio
SEM-EDX	No destructivo Destructivo	Adecuada (sección pulida)	Muy adecuada (superficie)	-	Medio
AAS	Destructivo	-	Muy adecuada	Adecuada	Alto
AES	Destructivo	-	Muy adecuada	Adecuada	Alto
XRF	No destructivo	-	Muy adecuada (superficie)	Adecuada	Medio
PIXE	No destructivo	-	Muy adecuada (superficie)	Muy adecuada	Alto
XPS	No destructivo	-	Adecuada (determina estados de oxidación)	-	Alto

La moderna ciencia de los materiales carece de ciertas limitaciones que son intrínsecas al estudio de materiales numismáticos. Por una parte, la rentabilidad que se obtendrá de las conclusiones del estudio hace que, dentro de ciertos límites, los estudios de materiales actuales tengan menos limitaciones presupuestarias. Por otra parte, fruto de esa misma circunstancia, resulta asumible la

destrucción de la cantidad de muestra que sea necesaria. Estos dos aspectos son directamente contrapuestos con la realidad de los estudios numismáticos, como es fácil de entender. En consecuencia, la metodología utilizada por los científicos y técnicos especializados en el estudio de materiales no es directamente exportable a la investigación numismática. Esto fue rápidamente entendido por los investigadores dedicados a la Arqueometalurgia, quienes comenzaron a desarrollar metodologías y rutinas analíticas propias. Lógicamente, las incógnitas referidas a los procesos metalúrgicos en sí mismos han capitalizado las investigaciones en esta área, que se han centrado en el estudio de escorias, restos de fundición y los primeros objetos metálicos producidos. La bibliografía en este campo es inmensa, pero no pueden dejar de citarse el Proyecto Arqueometalúrgico de Huelva (Blanco y Rothenberg, 1981) y el conjunto de estudios sobre el Proyecto de Arqueometalurgia de la Península Ibérica (Rovira *et alii*, 1997; Delibes y Montero, 1999; Rovira y Gómez, 2003). Metodológicamente, una de las obras de mayor interés realizada en España es el estudio genérico sobre la obtención de metales en la Prehistoria peninsular que constituye la Tesis Doctoral de Pablo Gómez Ramos (Gómez, 1999). De forma más específica para los bronce, también se cuenta con trabajos de referencia, como el de Fernández y Sarabia (1998). Paradójicamente, el gran desarrollo de estudios sistemáticos sobre metalurgia no ha ido acompañado en nuestro país de un desarrollo paralelo para otros aspectos de la metalurgia, como es el tratado en estas líneas. La metodología aplicada en los estudios citados no es tampoco específica para el estudio de numismas. Fuera de nuestras fronteras se cuenta en este sentido con precedentes del mayor interés, como es la serie *Metallurgy in Numismatics*, de la Royal Numismatic Society (UK), que cuenta ya con cuatro volúmenes. Sin embargo, todavía se echa en falta a nivel peninsular algún tipo de simposio o *workshop* sobre análisis y técnicas analíticas en numismática, en el que homogeneizar criterios y metodologías para dotar de mayor utilidad conjunta a los estudios monográficos que se vienen realizando, lo cual reclamamos desde aquí.

Agradecimientos

El autor desea manifestar públicamente su agradecimiento al MICINN por su beca predoctoral FPU, así como a sus directores de Tesis, los Dres. Miguel Ángel García Aranda y Laura León Reina, de la Universidad de Málaga, por el tiempo y el esfuerzo invertidos en su formación arqueométrica. También agradece a Gregorio Martín, de los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación

(SCAI) de la Universidad de Málaga, por la paciencia que siempre nos mostró durante el aprendizaje en el uso de la microscopia electrónica de barrido. Por último, pero no por ello menos importante, también desea agradecer a todos aquellos estudiosos y coleccionistas con los que ha mantenido productivos intercambios de impresiones, así como por las facilidades dadas para el estudio de sus materiales.

Bibliografía

- ALFARO, C. (1999): "Un cuño para la fabricación de moneda ebusitana", en Mora, G., Sobral, R.M., García-Bellido, M.P., *Rutas, ciudades y moneda en Hispania: Actas del II EPNA, Anejos AEspA*, 20, 185-191, Madrid.
- BAYLEY, J y BUTCHER, S. (2004): *Roman brooches in Britain. A technological and typological study based on the Richborough Collection*, London.
- BLANCO, A. y ROTHENBERG, B. (1981): *Exploración Arqueometalúrgica de Huelva*, Barcelona.
- BUTCHER, K y PONTING, M. (2005): "The roman denarius under the Julio-Claudian emperors: mints, metallurgy and technology", *Oxford Journal of Archaeology*, 24(2), 163-197.
- CANTO, A., MARTÍN, F. y VICO, J. (2002): *Monedas Visigodas: Catálogo del Gabinete de Antigüedades*, Madrid.
- CALVO, F.A. (1972): *Metalografía práctica*, Madrid.
- CAVADA, M. (1994): *La crisis económico-monetaria del s. III: ¿un mito historiográfico? Avances del resultado de los análisis metalográficos sobre dos tesorillos de la provincia de Lugo*, Santiago de Compostela.
- CEBRIÁN, M.A. (2007): "Metales y técnica en la numismática antigua: La anatomía de la moneda", *Sautuola*, 13, 105-112.
- COPE, L.H. (1972): "Surface-silvered ancient coins". En Hall, E.T. y Metcalf, D.M. (eds.), *Methods of Chemicals and metallurgical investigation of ancient coinage*, RNS Special Publication No. 8, 261-278, London.
- COPE, L.H., KING, C.E., NORTHOVER, J.P. y CLAY, T. (1997): *Metal analyses of Roman coins minted under the Empire*. British Museum Occasional Paper, 120, London.
- CRAWFORD, M. H. (1974): *Roman Republican Coinage*, Cambridge (citado como RRC).
- DELIBES, G. y MONTERO, I. (1999): *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. II. Estudios regionales*, Madrid.

- DOMÍNGUEZ, A. (1997): “Las acuñaciones ibéricas y celtibéricas de la *Hispania Citerior*”. En Alfaro, C., Arévalo, A., Campo, M., Chaves, F., Domínguez, A. y Ripollès, P.P. *Historia monetaria de Hispania antigua*, 116-193, Madrid.
- FELIÚ, M.J. (1996): “La microscopía electrónica de barrido en el estudio de materiales arqueológicos”. En Pérez, J., Aguarod, C., Lapuente, M.P., Feliú, M.J. y Pernot, M. *Arqueometría y caracterización de materiales arqueológicos* (Cuadernos del Instituto Aragonés de Arqueología, IV), 25-34, Teruel.
- FELIÚ, M.J., LÓPEZ, D., MARTÍN, J. y ROVIRA, S. (1994a): “Técnicas de fabricación de monedas forradas de plata: nuevos datos para la polémica”, *Numisma*, 234, 21-45.
- FELIÚ, M.J., LÓPEZ, D., MARTÍN, J. y ROVIRA, S. (1994b): “Técnicas de fabricación de denarios forrados: estudio analítico y metalográfico”, En García-Bellido, M.P., Sobral, M.R. (coords.), *La moneda hispánica: ciudad y territorio. Actas del I EPNA. Anejos de AEspA*, 14, 29-32, Madrid.
- FERNÁNDEZ, J. y SARABIA, F.J. (1998): *Arqueometalurgia del bronce: introducción a la metodología de trabajo*, Valladolid.
- GARCÍA, E. (1999): “Especies, metal, moneda: Consideraciones en torno a la cuantificación de las exacciones romanas en Hispania republicana”. En Centeno, M.R.S., García-Bellido, M.P. y Mora, G. (coords.), *Rutas, ciudades y moneda en Hispania. Actas del II EPNA. Anejos de AEspA*, 20, 39-46, Madrid.
- GEISSEN, A. y WEISER, W. (1983): *Katalog alexandrinischer kaisermünzen der sammlung des Institute für Altertumskunde der Universität zu Köln*, Band IV, Claudius Gothicus-Bleimünzen, Opladen (citado como G).
- GIL, O. (1993): *Introducción a la Numismática*, Barcelona – Madrid.
- GITLER, H. y PONTING, M. (2003): The silver coinage of Septimius Severus and his family (AD 193-211) A study of the chemical composition of the Roman and Eastern Issues, *Glaux* 16, Milano.
- GOFFER, Z. (2007): *Archaeological Chemistry* (2nd. Ed.), New Jersey.
- GOMES, M., PEIXOTO, J.M. y RODRIGUES, J. (1995): *Ensaio sobre história monetária da monarquia visigoda*, Porto.
- GÓMEZ, P. (1999): *Obtención de metales en la Prehistoria de la Península Ibérica*, BAR International Series 753, Oxford.
- GOZALBES, M. (2009): *La ceca de Turiazu. Monedas celtibéricas en la Hispania republicana*. Valencia.
- GUERRA, M.F. (2000): “Em busca da origem do ouro dos Visigodos através dos seus elementos traço”, en Hipólito, M.C., Metcalf, D.M., Cabral, J.M.P. y Crusafont, M. (Eds.), *Homenagem a Mário Gomes Marques*, 223-251, Sintra.
- GUERRA, M.F. (2004): “The circulation of monetary gold in the portuguese area from the 5th Century to nowadays”. En Perea, A., Montero, I. y García-Vuelta, O. (eds.), *Tecnología del oro antiguo: Europa y América. Anejos de AEspA*, 32, 423-431, Madrid.

- HOLLER, J., NIEMAN, T. y SKOOG, D.A. (2000): *Principios de Análisis Instrumental* (5ª Ed.), Madrid.
- HÜFNER, S. (1995): *Photoelectron spectroscopy* (3rd. Ed.), Berlín.
- HURLBUT, C.S. y KAMMERLING, R.C. (1993): *Gemología* (2ª Edición en español), Barcelona.
- LA NIECE, S. (1998): "Metallography in Numismatics", en Oddy, W.A. y Cowell, M.R., *Metallography in Numismatics*, Vol. 4. (Royal Numismatic Society Special Publication No. 30.) Vol. 4, 114-133, London.
- MARTINÓN-TORRES, M. y REHREN, T. (2002): "Agricola and Zwickau: theory and practice of Renaissance brass production in SE Germany", *Historical Metallurgy*, 36(2), 95-111.
- METCALF, D. M. (2000): "Many mint-places, few coins. Visigothic coinage in Gallaecia and Northern Lusitania", en Hipólito, M.C., Metcalf, D.M., Cabral, J.M.P. y Crusafont, M. (Eds.), *Homenagem a Mário Gomes Marques*, 175-194, Sintra.
- MONTERO, I., (2000): *Arqueometalurgia en el Mediterráneo*, Madrid.
- MONTERO, I., GARCÍA, M. y LÓPEZ-ROMERO, E. (2007): "Arqueometría: Cambios y tendencias actuales". *Trabajos de Prehistoria*, 64(1), 23-40.
- MORA, B. (1993): *Estudio de moneda %ammkdí en Málaga. El hallazgo de dirhames de Ardales*. (Textos mínimos de la Universidad de Málaga, nº 21), Málaga.
- MORA, B. (e.p.): "Ponderales, moneda y mercado en la Málaga tardopúnica: La primera monetización de Malaca y su territorio", *Actas del IV EPNA*.
- OROL, A. (1982): *Acuñaiones de Alfonso IX*, Madrid.
- PARRADO, M.S. (1998): *Composición y circulación de la moneda hispano-romana en la meseta norte*, Valladolid.
- PEIXOTO, J.M. (1995): "Métodos físicos e químicos de análise no estudo da composição das ligas de que são feitas as moedas". En García-Bellido, M.P., Sobral, M.R. (coords.), *La moneda hispánica: ciudad y territorio. Actas del I EPNA. Anejos de AEspA*, 14, 15-24. Madrid.
- PEIXOTO, J.M. y METCALF, D.M. (1997): *A moeda Sueva/Suevic coinage*, Porto
- PENSE, A.W. (1992): "The decline and fall of the Roman *denarius*", *Materials Characterization*, 29, 213-222.
- PLIEGO, R. (2009): *La moneda visigoda*, Sevilla.
- POLLARD, M., BATT, C., STERN, B. y YOUNG, S.M.M. (2007): *Analytical chemistry in Archaeology*, Cambridge.
- PROKOPOV, I., PAUNOV, E. (2004): *Cast forgeries of Classical Coins from Bulgaria*, Sofia.
- RAMAGE, A. y CRADDOCK, P. (2000): *King Croesus' gold. Excavations at Sardis and the history of gold refining*, London.

- REVIE, R.W. (2000): *Uhlig's corrosion handbook* (2nd Ed.), New York.
- ROMA, A. y GUITIÁN, F. (2010): *Composición metálica de las monedas leonesas y castellanas de la Edad Media*, Santiago de Compostela.
- ROVIRA, S. (2006): "XIV. Estudio metalográfico", en García-Bellido, M.P. (Coord.), *Los campamentos romanos en Hispania (27 a.C.-192 d.C.). El abastecimiento de moneda*, 607-621, Madrid.
- ROVIRA, S. y GÓMEZ, P. (2003): *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. III. Estudios metalográficos*, Madrid.
- ROVIRA, S., MONTERO, I. y CONSUEGRA, S. (1997): *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. I. Análisis de materiales*, Madrid.
- SÁNCHEZ, J. (1989): *De minería, metalúrgica y comercio de metales. La minería no férrica en el Reino de Castilla. 1450-1610*, Salamanca.
- SARABIA, F.J. (1998): "El examen morfológico de la superficie de una pieza de bronce: el MEB". En Fernández, J. y Sarabia, F.J. (coords.), *Arqueometalurgia del bronce: introducción a la metodología de trabajo*, 81-92, Valladolid.
- SCOTT, D.A. (1991): *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*, Marina del Rey (California).
- SCOTT, D.A. (1994): "An examination of the patina and corrosion morphology of some Roman bronzes", *Journal of the American Institute for Conservation (JAIC)*, 33(1), 1-23.
- TYLECOTE, R.F. (1987): *The early history of metallurgy in Europe*, London-New York.
- VICO, J., CORES, M.C. y CORES, G. (2006): *Corpus Nummorum Visigothorum. Ca. 575-714. Leovigildus-Achila*, Madrid.
- VILLARONGA, L. (1995): *Denarios y quinarios ibéricos. Estudio y catalogación*, Barcelona.
- VLACHOU-MOGIRE, C., STERN, B. y McDONNELL, J.G. (2007): "The application of LA-ICP-MS in the examination of the thin plating layers found in late Roman coins", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 265, 558-568.