

IACOPO CIABATTI*

Coppellazione: dal trattamento di affinazione su larga scala alle origini dell'analisi chimica quantitativa

Cupellation: from the large-scale refining treatment to the beginning of the quantitative chemical analysis

Summary – Until the mercury amalgam extractive process, large-scale cupellation was the only economical mean for recovering silver from ores. On the basis of its subsequent socioeconomic importance, cupellation represents a critical breakthrough comparable to the discovery of fire. From the ancient literary records to the modern activity, in this personal account other metallurgic treatments, as cementation and liquation, are presented in relation to cupellation. A particular attention is reserved to Georgius Agricola and his treatise *De re metallica*, the monumental opera of 16th century. It is noteworthy the degree of experimental sophistication of the cupellation assay at least two centuries before the existence of any modern chemical theory and the era of the quantitative chemistry. Cupellation is still used today in *tandem* with modern instrumental techniques in the quantitative analysis of precious metals.

Riassunto – Prima dell'utilizzo del mercurio come agente di estrazione dei metalli nobili, il processo metallurgico della coppellazione costituiva la tecnica di raffinazione dell'argento più diffusa. Sulla base dei suoi pesanti risvolti socio-economici, l'importanza della coppellazione viene spesso paragonata a quella della scoperta del fuoco. Con questo personale contributo vengono ripercorsi gli eventi e le circostanze storiche che hanno favorito ed incentivato il passaggio all'utilizzo della coppellazione in ambito analitico a partire dal medesimo processo applicato su larga scala. Particolare attenzione è stata riservata al trattato *De re metallica* di Giorgio Agricola, la prima opera in cui in maniera concisa compaiono descrizioni dettagliate inerenti alla «prova del fuoco». Benché noto da circa 6000 anni, ancora oggi questo antico trattamento continua ad essere utilizzato come saggio (spesso in *tandem* con altre tecniche strumentali) rivestendo un ruolo di primo piano nel campo dell'analisi chimica quantitativa dei metalli preziosi.

Key words: cupellation, Agricola, metal refining, litharge, assay

* Università di Bologna, Dipartimento di Chimica Industriale «Toso Montanari», Viale Risorgimento 4, Bologna. E.mail: iacopo.ciabatti2@unibo.it

Introduzione

La manipolazione dei metalli trovati allo stato nativo costituì per l'uomo la prima occasione per comprenderne le peculiari proprietà. Oro, rame e argento sono stati i primi metalli scoperti ed è facile immaginare come l'aspetto lucente che li contraddistingue abbia potuto da subito catturare l'attenzione dell'uomo. Fatta esclusione per l'oro però, in natura, tutti i metalli si trovano principalmente o esclusivamente sotto forma di minerale. Lo sviluppo della metallurgia estrattiva rappresenta una conquista scientifica dal pesante risvolto socio-economico, fondamentale per lo sviluppo di una civiltà. È probabile che l'estrazione del metallo dal minerale costituisca non tanto un ostacolo da superare ma da identificare. È opinione diffusa far risalire la scoperta della metallurgia estrattiva ad eventi casuali come l'incendio di grandi foreste al termine dei quali era possibile trovare materiale metallico negli avvallamenti del terreno [16]¹.

A causa della semplicità del processo, anche la scoperta della coppellazione viene comunemente associata ad un evento di tipo accidentale. La datazione di alcuni resti rinvenuti nelle regioni dell'Anatolia e della Mesopotamia suggeriscono che questa tecnica di affinazione fosse già nota intorno al 4000 a.C. [12]. Riconoscere nella scoperta della coppellazione una localizzazione temporale e spaziale risiede nella convinzione che la confidenza con questa arte sia il frutto di un difficile e non lineare processo di apprendimento, troppo complesso da potersi ripetere più volte. Andrebbe comunque ricordato che nella storia della scienza non mancano esempi di scoperte simili avvenute in maniera del tutto indipendente. L'origine della coppellazione nel mondo antico rappresenta ancora oggi oggetto di un inconcluso dibattito incapace di stabilirne con esattezza «luogo e data di nascita» [6, 16].

Il trattamento metallurgico

La coppellazione è un processo metallurgico utilizzato per purificare i metalli nobili, come argento e oro, dai metalli vili. Tale operazione consiste nella fusione ossidativa del piombo argentifero il quale, trasformatosi in litargirio, segrega dalla lega madre che si arricchisce di metalli preziosi rimasti allo stato ridotto². Insieme

¹ Il processo di estrazione del metallo dal minerale richiede condizioni molto drastiche difficilmente garantibili dalla presenza di un incendio boschivo. La difficoltà del trattamento non risiede nell'abbondanza del metallo ma nelle temperature di esercizio; ciò è confermato dalla diffusione del rame e delle sue leghe prima di quella del ferro, nonostante quest'ultimo sia largamente più disponibile. Sulla base di queste osservazioni pare più razionale immaginare che la trasformazione chimica possa essere avvenuta in una zona circoscritta quale quella del fuoco domestico. Infatti i minerali di rame, noti per l'intensa colorazione, venivano utilizzati come oggetti ornamentali che in qualche modo sarebbero venuti a contatto con il fuoco.

² In termini termodinamici tale processo chimico può essere giustificato sulla base della

al piombo anche gli altri metalli vili vengono ossidati entrando in miscela con il litargirio, successivamente eliminata sia per azione manuale (nel trattamento su larga scala), che per assorbimento capillare sul letto poroso del forno³. In ambito di analisi il saggio viene fatto mediante utilizzo di speciali crogioli porosi chiamati «coppelle» (figura 1). Generalmente la temperatura dei forni si aggira intorno a 850°C, valori più elevati comportano un inevitabile incremento della perdita di metallo prezioso. A fine trattamento, terminata l'ossidazione del piombo, il fuso della lega dei metalli nobili si solidifica istantaneamente dando luogo al cosiddetto *lampo d'argento*⁴. Nella successiva fase di raffreddamento, nel caso di un elevato tenore di argento il prodotto si cricca frammentandosi vigorosamente⁵. Il prodotto ottenuto è una lega di metalli nobili ad elevata purezza [2].

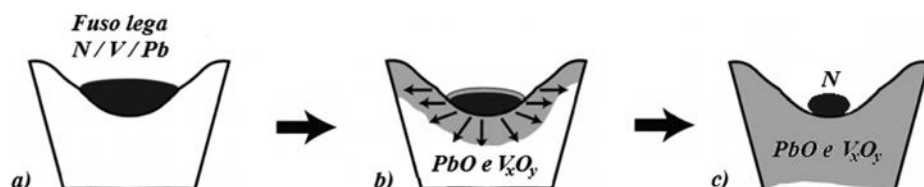
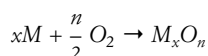


Fig. 1. Schema generale del saggio di coppellazione raffigurato nei suoi passaggi più rappresentativi: a) fusione delle lega metallica; b) ossidazione del piombo e dei metalli vili (V) con conseguente loro assorbimento all'interno della coppella; c) formazione del bottone costituito dai metalli nobili (N).

comparazione dell'energia libera di Gibbs (ΔG) della reazione di ossidazione del metallo (M) vile con quello nobile:



Infatti, a 850°C il ΔG di formazione del litargirio ammonta a -53 KJ/mol ($\Delta H^\circ = -219$ KJ/mol; $\Delta S^\circ = -100.8$ J/mol K; $C_p = 64.6$ J/mol K), valore nettamente inferiore rispetto a quello dell'ossido di argento ($\Delta H^\circ = -31$ KJ/mol; $\Delta S^\circ = -66.4$ J/mol-K; $C_p = 65.9$ J/mol-K) pari a 98 KJ/mol [8].

³ La tensione superficiale dei metalli nobili fusi, superiore a quella degli ossidi dei metalli vili, impedisce l'assorbimento per azione capillare. Si vuole inoltre sottolineare che il litargirio funge sia da catalizzatore di ossidazione dei metalli vili oltre che da veicolante dei prodotti formati [2].

⁴ Infatti, liberato il piombo sotto forma di litargirio, il fuso della lega metallica si trova in una fase di metastabilità a causa della sua temperatura, inferiore a quella di fusione. Questo induce l'immediata solidificazione della massa con conseguente rilascio del calore latente che si manifesta con un lampo di luce intensa.

⁵ Questo fenomeno, detto *rocciamento*, è dovuto alla capacità dell'argento fuso di assorbire l'ossigeno atmosferico fino a 22 volte il proprio volume il quale viene vigorosamente rilasciato nella fase di solidificazione con una conseguente proiezione di frammenti. Nei saggi di analisi, se non si adottano le dovute precauzioni, costituisce una evidente fonte di errore, mentre nell'ambito della produzione su larga scala non costituisce un problema.

Attività di coppellazione in età antica

Sebbene il processo di coppellazione fosse largamente utilizzato fin dall'antichità, la ricostruzione storica antecedente l'età classica greco-romana è basata principalmente sullo studio dei resti delle lavorazioni⁶. I documenti che testimoniano le attività di questo periodo sono silenti riguardo alle metodologie di lavoro e le informazioni che se ne possono ricavare sono ben poche. La scarsa attenzione nel descrivere in maniera chiara e articolata tale tecnica è da imputare in parte all'analfabetismo degli artigiani ma soprattutto al loro interesse nel mantenerle segrete [11].

È bene sottolineare che la coppellazione nasce e si diffonde principalmente come trattamento di estrazione e solo indirettamente di affinazione. I minerali da cui viene estratto il piombo infatti contengono occluse significative quantità di preziosi quali soprattutto argento. Inizialmente l'utilità del trattamento risiedeva nell'estrazione dei metalli nobili presenti in lega con il fuso di piombo ottenuto mediante metallurgia estrattiva. Solo in un secondo momento si intuì che l'aggiunta volontaria di piombo permetteva di purificare i metalli nobili presenti in lega con i metalli vili. Uno dei più importanti testi ritrovati che documenta questa presa coscienza è il papiro di Leida, probabilmente datato alla fine del III secolo a.C. Benché la sua scoperta costituisca la più antica testimonianza di ricettario chimico, le procedure non sono dettagliate e probabilmente servivano solo da promemoria per persone già esperte [4]: *Come l'argento viene purificato e fatto brillante. Prendere una parte di argento ed un ugual peso di piombo; adagiarlo in un forno, e mantenere in fusione fino a che il piombo venga consumato; ripetere l'operazione più volte fino a che esso diventerà brillante.*

Generalmente la porosità del letto del forno era garantita disponendo del materiale assorbente costituito da resti di animali come ossa e corni, ceneri e più raramente da argilla [11]. Il punto di forza della coppellazione risiedeva nella capacità di poter separare, con un singolo trattamento metallurgico, tutti i metalli preziosi da quelli vili. Con l'avvento della moneta si rese necessario elaborare delle tecniche che permettessero di separare l'argento dall'oro ottenuti in lega nel processo di coppellazione. Non dovette passare molto tempo prima che si riuscisse nell'intento attraverso il processo chiamato *cementazione*. Il più antico esempio rinvenuto è quello in Lidia all'età di Creso in cui le pagliuzze d'oro venivano disposte a strati alterni con il cosiddetto «cemento», miscela di cloruro di sodio e materiale siliceo, all'interno di olle di terracotta introdotte in una fornace⁷. Alla fine del trattamento

⁶ L'analisi archeometallurgica condotta sui manufatti antichi è basata sulla determinazione e quantificazione dei contaminanti. Infatti l'argento ricavato dai trattamenti di coppellazione è caratterizzato da una percentuale residua di piombo compresa tra 0.05 e 2.5%. Tuttavia, mentre tenori inferiori escludono tale trattamento, percentuali più elevate di piombo potrebbero essere dovute ad inclusioni nel minerale di base.

⁷ La temperatura del forno deve essere tale da non indurre fusione nel metallo. La forma-

L'oro veniva «lavato» per liberarlo dai sali di argento eccedenti a quelli sequestrati dalla polvere di mattoni immessa. Sebbene il processo di assorbimento ricordi molto quello della coppellazione i due trattamenti sono chimicamente distinti e indipendenti. Probabilmente l'ulteriore aggiunta del piombo in uso nell'Antico Egitto volgeva proprio nel tentativo di unificare i due processi, come documentato da Diodoro Siculo nel 60 a.C. [13]⁸: *La polvere d'oro recuperata viene portata a uomini specializzati che la mettono in giare d'argilla insieme ad un pezzo di piombo, grani di sale, un po' di stagno e crusca d'orzo. Chiusi bene i vasi li cuociono nella fornace per cinque giorni, dopo di che, raffreddati, vi si trova solo oro, mentre sono scomparse tutte le altre cose messe assieme...*

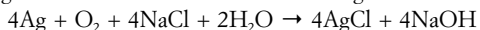
La coppellazione in età classica non fu altro che la continuazione di quella antica. Nel campo della metallurgia, i romani più che degli innovatori, furono eccellenti amministratori delle imprese minerarie. L'ottimizzazione della tecnica permise di abbassare drasticamente il contenuto di preziosi rimasti nel litargirio i cui tenori si aggiravano intorno a 60 g/tonnellata [6].

L'elevata variabilità del titolo di argento nel piombo non garantiva una pronta e sicura stima dei guadagni ottenibili dalla scoperta di un nuovo giacimento minerario. In linea di principio, queste perplessità sull'effettiva convenienza del trattamento, costituiscono l'elemento propulsore per l'impiego della coppellazione anche in campo analitico. D'altro canto, l'assenza di testimonianze di simili attività mette in ombra la possibilità di un loro così anticipato sviluppo probabilmente anche perché l'estrazione del piombo, metallo molto richiesto per il suo diffuso utilizzo, sarebbe stata condotta a prescindere. Sulla base delle culture e delle conoscenze del periodo è più probabile che venissero fatte delle valutazioni grossolane conducendo dei piccoli trattamenti su scala ridotta, ancora troppo grezzi da poter essere definite delle analisi.

L'intermezzo medioevale

Con la caduta dell'Impero romano, la mancanza di un potere centrale forte ed indiscusso portò al conseguente declino dell'attività metallurgica. Da sempre i trattamenti di raffinazione dell'oro erano intimamente legati all'alchimia riconoscendo

zione dell'argento cloruro è garantita dalla presenza di aria (ambiente ossidante) e vapore acqueo ottenuto impiegando legna come combustibile secondo la seguente reazione:



Alternativamente un'altra tecnica di separazione prevedeva l'aggiunta di zolfo e carbone al fine di trasformare l'argento in argento solfato che, galleggiando in superficie poteva essere facilmente rimosso.

⁸ Viene riportata l'ultima operazione della lavorazione delle sabbie aurifere dove l'oro è presente in segregazione di fase dal resto della massa. Probabilmente il basso tenore di metalli vili della lega oro-argento richiede quantità minoritarie di piombo per la coppellazione rendendo questo trattamento compatibile in concomitanza a quello della cementazione.

nella coppellazione un'operazione miracolosa in grado di trasformare, seppur parzialmente, il metallo vile in metallo nobile. Difficile avere un'idea oggettiva di quanto queste credenze potessero essere radicate nel pensiero comune poiché la maggior parte delle testimonianze pervenute costituiscono più che delle riflessioni dei ricettari di natura tecnica.

Nel XII secolo compaiono però i primi testi con chiari riferimenti all'utilizzo della coppellazione intesa come saggio di analisi. Nel ricettario *De diversis artibus*, Teofilo descrive a più riprese il materiale di rivestimento delle coppelle ottenuto mescolando ossa di animali con ceneri di legno di faggio [14]. L'utilizzo della «prova del fuoco» si stava sempre più diffondendo soprattutto a fronte della lotta contro la contraffazione delle monete. In ogni regno, tutte le attività metallurgiche strettamente legate al conio erano regolamentate e disciplinate da statuti. Ne è un esempio l'ordinanza emanata dal re di Francia Filippo VI nel 1343 in cui, tra le altre cose, erano contenute le procedure dei saggi di coppellazione. Tale documento costituisce uno dei primi tentativi di standardizzazione del metodo di analisi intesa come l'unica procedura riconosciuta da seguire.

Nel XV secolo si registra il crescente utilizzo della *liquazione*, tecnica metallurgica che permette di estrarre argento e oro dal rame [16, 6]. Tale trattamento prevede la fusione di una parte di rame, contenente i preziosi, con tre parti di piombo. Durante il lento raffreddamento del fuso, i metalli preziosi entrano in lega con il piombo segregando dal rame. Il successivo blando riscaldamento della massa permette di far sciogliere solo la lega di piombo che trasuda lasciando pani porosi di solo rame. Lo sviluppo dell'operazione di liquazione favorì l'intensificazione dell'attività di coppellazione ad essa strettamente associata nella successiva estrazione dei metalli nobili dal piombo. Scorrendo tra la letteratura, similmente a quanto osservato per il processo di cementazione, ci si imbatte su descrizioni quantomeno ambigue, difficilmente interpretabili a causa della loro essenzialità. Ad esempio, in un testo arabo del X secolo viene così riportato [11]: *L'argento potrebbe essere separato dal rame nella coppella grazie alla continua aggiunta di piombo fino a che il suo stato non appare puro.*

In questo caso l'aggiunta di piombo non è da imputare ad un trattamento di liquazione ma ad un classico processo di coppellazione. L'inconveniente di coppelare direttamente leghe di rame a basso titolo risiede nell'utilizzo di elevate quantità di piombo al punto da renderlo inadeguato su larga scala, ma praticabile a livello di saggio [13]. Per quest'ultimo, l'eccessiva mole di piombo allunga il tempo di permanenza nel forno favorendo un'intollerabile volatilizzazione dell'argento che quindi viene sottostimato⁹.

⁹ La quantità di metallo volatilizzato dipende, oltre che dal tempo di permanenza, anche dalla temperatura che non essendo uniforme su tutto il forno (in prossimità dell'apertura sarà chiaramente più bassa) rende impossibile una sua quantificazione. Un accorgimento semplice oggi utilizzato è quello di stimare la perdita in peso con l'ausilio di un *testimone* cioè un campione avente circa lo stesso tenore di argento, disponendolo in linea con quello incognito.

La coppellazione in età rinascimentale: origine dell'analisi quantitativa?

Il problema della coppellazione di matrici ricche di rame viene riconosciuto per la prima volta da Giorgio Agricola nella sua monumentale opera *De re metallica* la cui importanza risiede nell'aver contribuito a far crollare i pregiudizi nei confronti delle conoscenze tecniche, concepite esclusivamente sul piano manuale ed escluse da qualsiasi ambizione culturale [1]. Il libro, scritto con chiarezza e dotato di magnifiche illustrazioni di attrezzature minerarie, ebbe subito una grandissima popolarità e, ancora oggi non sfigura tra i classici della scienza.

Agricola discute sistematicamente della coppellazione sia nel contesto dei processi produttivi su larga scala che nell'ambito dei saggi (figura 2). Dei primi presenta una descrizione dettagliata riguardo la struttura dei forni di coppellazione utilizzati per l'affinazione dell'argento. Vengono fornite interessanti informazioni sugli stadi di preparazione del forno ed in particolare sulla disposizione del materiale per l'assorbimento del litargirio rinnovato alla fine di ogni trattamento. Tale preparazione consiste nel disporre e compattare mediante un mazzuolo, un preparato a base di argilla e ceneri a cui segue una lenta essiccazione mediante riscaldamento con un fuoco disposto nella camera sottostante (figura 2, C). La principale difficoltà risiede nell'evitare la formazione di cricche superficiali che condizionerebbero negativamente il successivo processo di assorbimento del litargirio durante la fase di coppellazione. Queste esaurienti descrizioni hanno permesso la pianificazione di recenti studi sperimentali concepiti nel tentativo di simulare le condizioni di lavoro dell'epoca al fine di apprenderne appieno le loro caratteristiche. Ricostruendo il

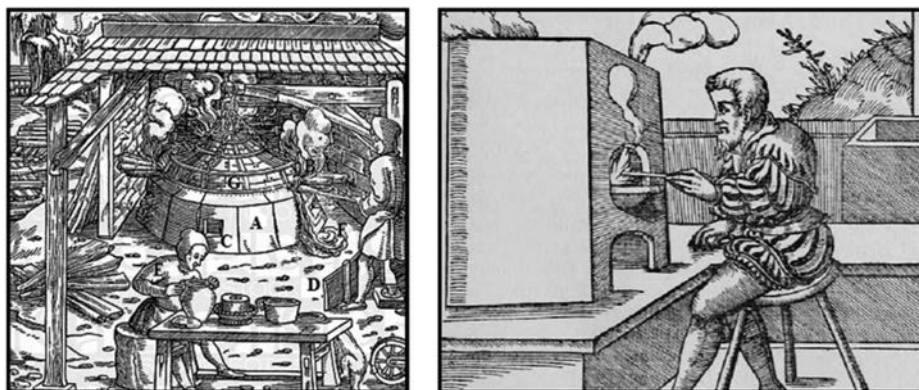


Fig. 2. A sinistra rappresentazione officina per affinazione dell'argento. La fornace (A) viene alimentata con legna (B) mentre parte del litargirio (*spuma argenti*, F) formatosi viene estratto meccanicamente da un operaio messo in sicurezza da una paratia (D). Il riferimento (C) indica la bocchetta di apertura della camera sottostante il letto del forno. Il caposquadra (E) mangia del burro per contrastare il rischio di avvelenamento dai fumi del piombo. Nella figura di destra viene illustrato un artigiano intento in un saggio di coppellazione. Raffigurazioni tratte dall'opera *De re metallica* (Agricola).

forno di coppellazione è stato possibile valutare l'influenza di importanti parametri come temperatura e potenziale ossidante dell'ambiente garantito dall'immissione forzata di aria mediante l'ausilio di soffietti da fucina [7].

Il pensiero di Agricola sull'arte mineraria è il culmine di un percorso intellettuale che nell'ultimo secolo aveva registrato una forte impennata, grazie soprattutto alla diffusione dei testi scientifici garantita dalla stampa. Da menzionare infatti l'opera di Ercker [5] e la pubblicazione di una serie di opuscoli anonimi dal titolo *Probierebüchlein*, la prima raccolta di procedure sui saggi di analisi, pietra miliare per lo sviluppo della chimica quantitativa [11]. La trattazione di Agricola è esauriente in tutte le sue parti e, se si eccettuano le moderne spiegazioni sulla base della teoria atomica, ben poche sono le migliorie registrate in epoca moderna. A differenza delle precedenti descrizioni alchemiche, Agricola espone i trattamenti metallurgici senza misticismo, scettico nel riconoscere il processo di coppellazione come una trasmutazione¹⁰. Illustra una pratica alternativa alla cementazione, già descritta da Biringuccio nell'opera *De la pirotechnia*, per discriminare il contributo dell'argento rispetto a quello dell'oro. Infatti il saggio di coppellazione classico permette di quantificare quello che in gergo viene indicato come «complessivo», ovvero il contenuto di tutti i metalli nobili. L'argento viene successivamente eliminato attraverso attacco con «acqua valens» (acido nitrico), il residuo ottenuto è detto oro da spartimento¹¹.

Con i saggi di analisi la bilancia diventa protagonista indiscussa del laboratorio, rigorosamente disposta in una campana di vetro al fine di evitare errori dovuti a spostamenti d'aria e a contaminazioni del campione. Le misure venivano sistematicamente eseguite in doppio e ripetute in presenza di valori discordanti. Si acquisiscono moderni concetti di analisi come la prova del bianco, condotta mettendo a coppedellare un campione di solo piombo successivamente utilizzato per il saggio. Il laboratorio di analisi viene concepito come un luogo in cui debba vigilare la massima attenzione [1]: «... *chiudere le porte della stanza dove si trova il forno di coppellazione, per paura che chiunque entrando in un momento inopportuno possa disturbare il pensiero di colui che è intento nel lavoro*».

È indiscutibile che regole come la legge di conservazione della massa e la teoria atomica di Dalton costituiscano i fondamenti essenziali di una nuova era nella storia della chimica basata sull'analisi quantitativa. Ma è altresì vero che il saggio di coppellazione non necessitava del moderno concetto di equivalente chimico poiché la sostanza isolata, metallo nobile, non subisce nessuna trasformazione chimica. Questo è il principale motivo di un suo così precoce sviluppo. Origine o

¹⁰ Si vuol sottolineare che il trattato non è completamente esente da riferimenti alchemici come dimostrano le descrizioni riguardo la presenza di spiriti e gnomi che popolavano le miniere.

¹¹ In presenza di tenori di oro più elevati, la lega risulterebbe non sufficientemente reattiva all'attacco con acido nitrico: è quindi necessario eseguire una «inquantazione» mediante l'aggiunta controllata di argento puro.

non origine, questo è un dibattito di secondaria importanza poiché dipende dal significato attribuitogli nel concepirlo come un evento circoscritto o di più ampio respiro. I grandi cambiamenti di pensiero, a differenza delle scoperte, non nascono mai dal nulla. Allo stesso modo la millenaria messa a punto dei saggi di coppellazione ha contribuito alla creazione di un terreno fertile per il successivo sviluppo dell'analisi chimica quantitativa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Agricola G., 1556. *Georgius Agricola. De Re Metallica (1530-1556). Un Dialogo sul Mondo Minerale e un Trattato sull'Arte de' Metalli*, a cura di Mancini P. e Mesini E.; CLUEB, 2008.
- [2] Ammen C.W., 1993. *Recovery and Refining of Precious Metals*, Deep Rock Resources Inc., second edition.
- [3] Biringuccio V., 1540. *Pirotechnia*, traduzione a cura di Smith C.S. e Gnudi M.T.; M.I.T. Chicago Press, 1972.
- [4] Caley E., Ohio M., 1926. *The Leyden Papyrus X. An English Translation with Brief Notes*, J. Chem. Educ., 3, 1149-1166.
- [5] Ercker L., 1574. *Treatise on Ores and Assaying*, traduzione a cura di Sisco A.G. e Smith C.S., University Chicago Press, 1963.
- [6] Giardino C., 1998. *I Metalli nel Mondo Antico. Introduzione all'Archeometallurgia*. Editori Laterza.
- [7] Guirado M.P., Téreygeol F., Peyrat F., 2010. *Initial Experiments on Silver Refining: How Did a Cupellation Furnace Work in the 16th Century*, Historical Metallurgy, 44, 126-135.
- [8] Lide D.R., 2007-2008. *Handbook of Chemistry and Physics 88th Edition*.
- [9] Lucrezio T.C., *Sulla Natura delle Cose: De Rerum Natura*. Anthony M. Esolen, trad. Baltimore: Univ. Johns Hopkins Pr., 1995.
- [10] Notton J.H.F., 1974. *Ancient Egyptian Gold Refining*, Gold Bull., 7, 50-56.
- [11] Nriagu J.O., 1985. *Cupellation: the Oldest Quantitative Chemical Process*, J. Chem. Educ., 8, 668-674.
- [12] Nriagu J.O., 1983. *Lead and Lead Poisoning in Antiquity*. Wiley, New York.
- [13] Siculo D., *Bibliotheca Historica*, Loeb Classical Library: London, 1935, volume III capitoli 12-14, 115-123.
- [14] Teofilo, *On Diverse Arts*, traduzione a cura di Hawthorne J.G. e Smith C.S., Univ. Chicago Press, 1951.
- [15] Torres M.M., Thomas N., Rehren T., Mongiatti A., 2008. *Some Problems and Potentials of the Study of Cupellation Remains: the Case of Post-Medieval Montbéliard, France*, Archo-Sciences, revue d'archéométrie, 32, 59-70.
- [16] Tylecote R.F., 1992. *A History of Metallurgy*, the institute of materials, second edition.

Un ringraziamento all'azienda TCA\Metal Precious Refiners e al Dir. Claudio Tavanti per le esaurienti informazioni inerenti alle vigenti procedure dei saggi di coppellazione.