

# INFORMACION

## Los procesos de Amalgamación a través de los tiempos

Por O. PUCHE RIART (\*), L. F. MAZADIEGO (\*\*) y M. MARTIN DIEZ

### LOS PRIMEROS TIEMPOS

La plata, junto con el oro y el cobre, fue quizá uno de los primeros metales conocidos por el hombre. Inicialmente se explotaron las pequeñas mineralizaciones de elementos nativos, presentes en filones, monteras o placeres. Pero el camino seguido hasta la concentración del oro y de la plata a partir de los minerales que los contienen fue largo. Ya en época romana, se experimentó un importante avance con el descubrimiento de la amalgamación, término que describe la aleación que se produce entre el mercurio y algunos metales, que generalmente se muestra sólida o semilíquida.

El mercurio, necesario en los procesos de amalgamación, ya era utilizado en la Edad de Piedra, aunque no como elemento nativo, sino como sulfuro, a modo de pigmento natural. Luego se extrajo como nativo, por destilación, y se empleó enseguida en la obtención de plata. La palabra amalgama procede del latín, apareciendo las primeras descripciones de procesos de amalgamación en obras de escritores romanos, tal es el caso de PLINIO (23-79 a.C.) y VITRUBIO (88-26 a.C.). Para el mencionado CAYO PLINIO SEGUNDO, según recogemos de la versión de la **Historia Natural**, traducida por GERONIMO DE HUERTA (1629), tenemos que: **"Todos los metales nadan sobre él (mercurio) fuera del oro, este solo le trae a sí: y por esto le purga bonifisimamente, despidiendo todas sus inmundicias..."**. Señala MODESTO BARGALLO (1955) que: **"Los romanos amal-**

**gaban oro para dorar el cobre con auxilio de la sal, y para separalo de vestidos previamente quemados"**.

No sabemos por que los romanos no amalgamaron la plata, esto tal vez se deba a que la interacción entre la superficie del oro nativo y el mercurio es mucho más fácil que en el caso de la plata. Esta última se oxida en el medio ambiente y suele aparecer recubierta de una pátina de óxido ( $Ag_2O$ ) o carbonato ( $Ag_2CO_3$ ) que impide el contacto entre los metales. En tal situación influiría también la mayor superficie específica y la distinta cinética en las reacciones de amalgamación.

También desconocemos como se les ocurrió añadir la sal, pero era un ingrediente normal en otros procesos metalúrgicos. Fue un hallazgo importante, ya que el cloruro sódico es un compuesto que favorece los procesos de disolución de sólidos que al oxidarse electroquímicamente generan cloruros estables. De esta forma las carrocerías de los coches sufren una mayor corrosión en las zonas costeras donde la halita es transportada por el aire en forma de aerosoles. En definitiva, la sal actúa como complejante secuestrando iones y ayudando a su estabilización.

Para algunos autores, tras la caída del Imperio romano hubo una lamentable pérdida de buena parte de los conocimientos técnicos. Asimismo, la mayor parte de los historiadores de Almadén piensan que con los visigodos hubo una paralización de las minas. Sin embargo, SAN ISIDORO, en **Las Etimologías**, XVI, 19, 3, señala que sí: **"sobre un sextario de mercurio se coloca...un escrúpulo de oro, al**

**punto lo engulle en su seno a pesar de su poco peso"**, existiendo otras citas sobre el mercurio y el bermeillon. A estos datos habría que añadir la existencia, en dicha época, de talleres donde se ejecutaban magníficos dorados al fuego y damasquinados, elaborados mediante amalgamas, lo que junto a otras consideraciones nos llevó a pensar en una continuidad de las explotaciones mercuriales sisaponenses en la Alta Edad Media (PUCHE, O. y BOSCH, A., 1995).

### AMALGAMACION Y ALQUIMIA

Los alquimistas no dejaron de mostrar su interés por el mercurio. La palabra alquimia procede del árabe "al-kimiya", siendo a este pueblo al que se le asigna el origen de tal ciencia, aunque algunos quieren situar sus inicios en el Egipto de los faraones. Fueron importantes los alquimistas persas JADIR (721-815) y AR RAZI (864-925); sin embargo, en Europa esta materia no adquirió un fuerte desarrollo hasta bien entrada la Edad Media. El primero de estos autores formuló la teoría, con base aristotélica, que los metales se producían mediante la unión del mercurio (frio y humedo) con el azufre (caliente y seco). Estas ideas, que han persistido hasta la Edad Moderna, son recogidas por IBN SINA (AVICENA) (927-1037) en **De congelatione et conglutinatione lapidum**, donde señala que **"si el Mercurio es puro y está solidificado por un Azufre inmaculado que no arde, un Azufre que no tiene ninguna impureza y que es mejor que el que pueden preparar los alquimistas, entonces se produce la Plata. Y si este azufre se presenta aun mas puro se produce el Oro"**. De igual forma, el

(\*) E.T.S. Ing. Minas de Madrid-Inhigeo.

(\*\*) E.T.S. Ing. Minas Madrid.

cobre se generaría de la combinación de mercurio puro y azufre impuro. Asimismo el hierro se obtendría mediante la unión de azufre y mercurio impuros.

En España, uno de los antecedentes alquímicos es el **Libro del Tesoro**, supuestamente atribuido a ALFONSO X, EL SABIO. Recordemos que en esta obra se trata de la preparación de amalgamas, aunque como buen tratado de alquimia muestra un lenguaje hermético. Es probable que esta característica estilística se fundamente en la necesaria protección frente a la incompreensión del vulgo que asociaba la química a la nigromancia. AGRICOLA, en el Prefacio **De Re Metallica** sustentaba la idea que en este colectivo había un predominio de los farsantes: "...está claro que sus discípulos, o no entendieron sus reglas o, si las entienden, no las practican; porque si las comprenden, tantos discípulos como ha habido y hay, habrían llenado ya ciudades enteras de oro y plata". Aunque ALFONSO X en el **Lapidario** (1250) mantiene criterio opuesto: "...los que se ocupan de la alquimia, a la que llaman obra mayor, deben parar mientes para que no dañen el nombre del saber, pues alquimia tanto quiere decir como maestría para mejorar las cosas...".

El fin primordial de la alquimia no era otro que el descubrimiento del mítico agente transmutador, denominado "lapis philosophorum" (piedra filosofal) que, por contacto, transformaba los metales en oro. Narran MAFFEI, E. y RUA FIGUEROA, R. (1871) que a finales del siglo XIII, o principios del XIV, el alquimista ARLANDO DE VILLANOVA se dedicaba: "a la investigación de la piedra filosofal y a la transmutación del mercurio en oro, atribuyéndosele con este motivo algunos escritos y experimentos, ...". Según SIRO ARRIBAS JIMENO (1993) este autor obtuvo el óxido rojo de mercurio, el cloruro de mercurio y otros compuestos de dicho metal. La consecución del cloruro, para nosotros, indica un probable manejo de los ingredientes necesarios en los procesos de amalgamación.

Influído por las teorías medievales, ALONSO BARBA (1559-1662), en el **Arte de los Metales** (1640), Cap. XVIII, de acuerdo con las teorías de los alquimistas ("odioso nombre por la multitud de ignorantes, que con sus

**embustes lo han desacreditado")** señala que las materias constitutivas de los metales son el azufre y el azogue, adicionados en proporciones variables según la especie mineral considerada. Dicho autor fundamenta esta teoría, en el Cap. XIX, por la presencia de abundante azufre nativo y menas sulfurosas en las minas, así como por unas observaciones particulares suyas: al fundirse por plata el mineral de Challatiri, a cuatro leguas de Potosí, se liberaba mercurio nativo entre la parte menos caliente de las cenizas. Más adelante, en el Cap. XXIII, BARBA señala que: "...tiene tanta conveniencia la naturaleza del azogue con la de los metales, que aunque no es ninguno de ellos, es convertible en todos, no solo por ser uno de los principios que se compone, como los mas Filosofos afirman, y prueba la facilidad que con todos ellos se unen, è incorpora, sino también porque con toda su substancia se transmuta en metal verdadero".

Los griegos habían supuesto la existencia de diferencias sexuales entre los minerales, de esta forma "arsénicos" no significaba otra cosa que macho. Esta dicotomía entre las especies mineralógicas se traslada a los alquimistas, los cuales elaboraron la **teoría de los contrarios**, en la que se indicaba que unos elementos se oponían a otros, tal es el caso del azufre y el agua. De este modo, en la unión de opuestos se engendraban los distintos metales, en el interior del Globo.

En México, el filósofo y médico sevillano JUAN DE CARDENAS (1563-....), en la **Primera parte de los problemas y secretos maravillosos de las Indias** (1591), tal vez influido por las teorías de ULISES ALDROVANDI (1522-1605) Fig. 1, señalaba que los beneficios de amalgama se debían a simpatías y antipatías. Las simpatías determinarían la unión del azogue a la plata ("**entre la sal y la plata se halla alguna amistad y conveniencia...**"). Esta unión sería favorecida por el calor que le presta la salmuera, como podía aportárselo otro material caliente ("**se hecha no para que se abraçe con nadie, sino para que, como material caliente, sirva de dar calor y actuar el azogue y otrosí ayudar a recocer, fermentar y esponjar todo aquel metal, porque mejor lo pueda penetrar el azogue y abraçarse con la plata. De donde se infiere que si en lugar de sal, se hechase cardenillo o cal viva o**



Figura 1. Ulises Aldrovandi (1522-1605)

**solimán o otro material caliente, como no consumiese y destruyese el azogue, haría tanto y mejor efecto que la sal, cuanto es material mas caliente").** La antipatía haría presencia entre el calor y el azogue, por su carácter contrario, lo cual determinaría las pérdidas de mercurio durante el proceso y no la conversión del azogue en plata como creían buena parte de los mineros. "**Jamás he visto minero rico ni descansado y todo lo atribuyo a ese negro gasto o consumido del azogue"**.

#### LA APLICACION DE AMALGAMAS A LA EXTRACCION DE PRODUCTOS DE MINA.

La existencia en Alemania de referencias escritas sobre el empleo de los métodos de amalgamación nos lleva a pensar que, en el caso de la plata, la paternidad de dichos procesos corresponde a este pueblo, a finales del siglo XV o principios del XVI. En las cartillas mineras germánicas, o **Probierbüch-lein**, se explica como se recupera la plata y el oro de retazos de monedas, bordados de sombreros (oro argentífero) o de pinturas doradas. Estos metales se exponían a la acción del mercurio, que era dosificado junto a otros ingredientes, tales como cenizas calientes (carbonatos alcalinos), argol (heces de vino), etc.

En 1540, VANNUCCI BIRINGUCCIO (1480-1539) en **De la Pirotechnia**, rea-

liza una recopilación de las técnicas de laboreo y concentración de menas, sentando en cierto modo las bases para el desarrollo metalúrgico en siglos posteriores. En esta obra se recoge un **Método de extracción de todas las partículas de plata o de oro de escorias de menas o de desperdicios de monedas, de bataduras de oro, de platero, así como del contenido de ciertas menas.** Tenemos la primera aplicación general de las amalgamas a materiales de mina y en particular a minerales de plata.

En el proceso de amalgamación descrito por BIRINGUCCIO se considera la adición de mercurio junto a otros reactivos, tales como sal común, vinagre o solución de sublimado y verdigris. El vinagre (ácido acético) suponemos serviría para limpiar la superficie de los granos facilitando la interacción entre mercurio y metal (de gran importancia en el caso de la plata). Por otro lado, el verdete o verdigris, probablemente acetato de cobre, sería un buen oxidante. Los romanos ya utilizaban el sulfato de cobre y la sal, junto a otras sustancias para separar el oro de la plata por fusión.

Según este autor, tras moler, lavar y secar las escorias de las fundiciones de minerales metalíferos y también, de forma directa, de las propias menas, el proceso de amalgamación es el siguiente: **"Se introduce en la tina el material que contiene oro,.... Mientras, se muele en dicho molino, se humedece el material con vinagre, o agua en la cual se haya disuelto sublimado, verdete y sal común. Se aplican dichos materiales con mercurio suficiente para cubrirlos: se agita durante una o dos horas, dando vueltas a la muela a mano o con caballerías, según sea el sistema aplicado. No se olviden que cuanto mas se restrieguen, mas absorberá el mercurio la substancia que los materiales contienen. Finalmente, hecho lo que se indica, se separará el mercurio de los residuos térreos, con un tamiz o por lavado, y se procede a la recuperación del mercurio. Este se libera con una pequeña cucúrbita (retorta), o bien se le obliga a pasar a través de una bolsa; y todo lo que queda en el fondo, oro, plata, cobre u otro metal, se echa en la tina para pulverizarlo bajo la rueda..."**

ALFONSO X, en el Libro del Tesoro cuenta como un egipcio llamado

MAIS le enseñó los secretos de la piedra filosofal, lo que le dió gran riqueza. En la poesía, en clave, donde describe lo anterior, nos ha parecido reconocer una técnica de amalgamación similar a la expuesta por BIRINGUCCIO, por coincidencia en los ingredientes que se aplican (PUCHE, O., 1995). Veamos el texto: **"Dos onzas de Oro juntad cimentando/ a una de Plata cendrada, e mui pura:/ fundid en crisol aquesta fechura:/ nueve de azogue le echad bien purgado/ despues con Vinagre, e Sal bien lavado/ ponedle otro tanto de Sal de comer/ tambien mesturado, ca aveis de facer/ que sea aquel cuerpo bien conglutinado"**. Pensamos que este texto desbanca las teorías de los que sostienen que el "mercurio filosofal" no es el mercurio nativo. Los alquimistas tenían el mercurio entre sus ingredientes básicos, los análisis por activación de cabellos de un miembro de este gremio, el rey CARLOS II de Inglaterra (1630-1685) señalaron la presencia de azogue, siendo posible que su muerte se debiese a una intoxicación aguda por este metal.

Otro autor del XVI que describe alguna técnica de amalgamación es GEORGE BAUER "AGRICOLA" (1494-1555) en *De Re Metallica* (1556). En el Prefacio de dicha obra señala como el embajador de Venecia, FRANCISCO BODARIO, le regaló el libro de BIRINGUCCIO. De esta obra copia diversos párrafos, pero sorprendentemente no recoge ninguna referencia sobre la amalgamación de la plata. En el libro VII se describe, por primera vez, un beneficio con preparación previa mediante quemado, en los ensayos de arenas o conglomerados auríferos procedentes de lavado, así como en los de polvo recogido por algún otro método. Por su importancia, haremos una transcripción literal: **"Una pequeña cantidad de él se humedece ligeramente con agua y se calienta hasta que comienza a despedir un olor, y entonces se añade a una porción de mineral dos porciones de azogue... Se mezcla juntamente con un poco de salmuera y se trituran con una mano de mortero...hasta que la mezcla tiene el espesor de una pasta y el azogue ya no se puede distinguir de los concentrados... Se lava el material (con agua templada) hasta que el agua fluye mas o menos limpia. Después de haber vertido agua fría dentro de la misma fuente, y rápidamente el azogue, que ha absorbido**

**todo el oro, se va uniendo y quedando a un lado, separando el resto de los concentrados hechos mediante lavado. El azogue se separa después del oro..."**. Los últimos pasos del proceso consistían en escurrir el exceso de mercurio apretando con una lona filtrante la pella, la amalgama que quedaba se purificaba en un crisol. También señala este autor como otros mineros realizaban el lavado con lejía y vinagre, mientras que otros no escurrían con lona, poniendo directamente la amalgama en una vasija de barro con tapadera de hierro que se sellaba, y posteriormente se colocaba dentro de un horno. Tras calentamiento el azogue se destilaba adheriéndose a las partes superiores y se recuperaba frotando con un trébol campestre. AGRICOLA indica que en este último método las pérdidas son mayores.

En el libro X también se describe la separación del oro de la plata mediante azogue, en objetos argentíferos dorados. El oro amalgamado: **"...se calienta con stibio (antimonio) en un crisol de tierra y se vierte a otro recipiente, por cuyo método el oro se deposita en el fondo y el stibio queda en la parte superior..."**

En definitiva AGRICOLA se mantiene, en la línea de lo expuesto en las cartillas mineras sajonas, sin introducir excesivas modificaciones. Este es el estilo de ERCKER (1574) y otros escritores alemanes posteriores. Sin embargo, la importancia de la obra de AGRICOLA consiste en su gran difusión e influencia que tuvo en los siglos posteriores.

#### IMPLANTACION DEL BENEFICIO INDUSTRIAL DE LA PLATA POR AMALGAMACION, EN LAS MINAS HISPANOAMERICANAS

Los ricos minerales auríferos y argentíferos americanos fueron inicialmente explotados cuando la mena aparecía como elemento nativo, ya que era la parte más superficial de los criaderos. El mineral de plata original depositado en yacimientos filonianos se conoce como mineral hipogénico o primario. Sin embargo, la mayoría de los grandes centros argentíferos de Hispanoamérica extraían menas secundarias, procedentes de las zonas de enriquecimiento de los filones, Fig. 2. En la parte superior de los yacimientos estaban los "pacos", que



Figura 2. Mina argentífera del Cerro de Pasco (Perú) según SIMONIN, L. (1867).

contenían plata nativa, hidróxidos de hierro, así como otros minerales argentíferos asociados a restos de mineral primario. En Nuevo Méjico los "pacos" recibían el nombre de "colorados" por la presencia del hidróxido de hierro. Por debajo del nivel freático, en ausencia de oxígeno libre, se producía, según MESEGUER PARDO (1949), un enriquecimiento en sulfuros ("mulatos"), así como de sulfoarseniuros y sulfoantimoniuros ("negrillos"). Ejemplos de "negrillos" son los "soroques" (con plomo) o el "cochizo" o "rosicler" (que son las platas rojas).

Los cloruros, asociados a la plata nativa, al igual que ésta también eran más fácilmente refinados por fusión. En cualquier caso, se esperaba una mayor productividad a medida que aumentaba la profundidad. Pero se contaba con dos problemas: el complicado proceso de refinado de los sulfuros y sulfosales, así como el peligro

de inundaciones en las minas, una vez alcanzado el nivel freático. Parece ser que inicialmente los desagües se realizaron por socavón, norias, malacates y otros artilugios sencillos, pese a que en el Libro VI de Agrícola aparecen representados diversos tipos de bombas de émbolo o "ctesibicas" (ya empleadas por los romanos). NICOLAS GARCIA TAPIA (1992) señala que estas bombas fueron introducidas por primera vez en las minas americanas por MIGUEL DE VIDAÑA y LUCAS PERES, en 1630, en las minas de Pachuca.

Quedaba, pues, por resolver la cuestión del aprovechamiento industrial de sulfuros y sulfosales. Es aquí donde se plantea la necesidad de un proceso alternativo: la amalgamación. Parece ser que la primera aplicación industrial de este proceso para la extracción de la plata se la debemos a BARTOLOME DE MEDINA (hacia 1554), inventor del **beneficio de**

**patio**, con el que se solventaron las dificultades antes expuestas.

Según LUIS BERRIO DE MONTALVO (1643) la amalgamación de la plata por azogue se la debemos al autor antes citado que la aplicó en Nueva España: "...**avrá ochenta años, Bartolomé de Medina puso en marcha, en las minas de Pachuca, sin mas arte que aver oydo dezir** (a un alemán) **en España, que con azogue y sal común se podía sacar la plata de los metales a que no se hallaba fundición**". Por otro lado, señalar que BERRIO, al igual que otros autores de la época, mantiene las teorías alquímicas de la conjunción del azufre y el mercurio en la formación de los metales.

Según MODESTO BARGALLO (1955) el minero de Pachuca VAZQUEZ DE SALAZAR (1571) señala que Medina llegó a estas minas en 1553: "...**dió la primera orden del beneficio de los**

metales con azogue y con ello se ha sacado muy mayor suma de plata que se sacaba antes por fundición, y así casi todos deshizieron los ingenios a fundir e los hornos de ellos y armaron mazos para moler". Parece ser que el método propuesto por Medina progresó con rapidez. De esta forma, en 1562, existían sólo en Zacatecas 35 haciendas donde se practicaba la amalgamación.

La frase que recogimos de VAZQUEZ DE SALAZAR nos permite intuir la importancia de la molienda en este método. Pese a que no sabemos cuándo y cómo se inicia ésta, es necesario moler para liberar los granos e incrementar su superficie específica, favoreciendo así las reacciones químicas de la amalgamación. En algunos casos se iniciaba el proceso mediante la trituración manual con mazos y batanes, para posteriormente obtener una masa harinosa en molinos semejantes a los que en España se empleaban para moler aceitunas. Parece ser que también se usaban las atahonas o arrastras, consistentes en piedras voladoras, Fig. 3, que giraban, suspendidas desde arriba, sobre una solera, siendo generalmente movidas por caballerías. En Perú, FERNANDO MONTESINOS (1642) describe como las moliendas manuales fueron sustituidas por maquinaria más sofisticada, como las realizadas con un mecanismo cigñal-almadeneta (similar a los descritos en la obra de AGRICOLA).

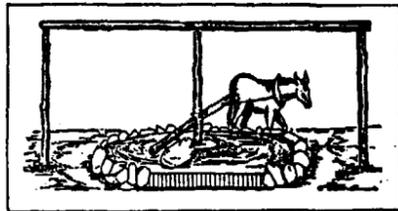


Figura 3. Molienda mediante arrastre, según FATHI HABASHI (1982)

La primera descripción del beneficio de patio se la debemos a JUAN DE CARDENAS (1591): "Toman el metal y muelenlo muy bien, y después amanzando con salmuera y encorporando con tantas libras de azogue, mas o menos según la ley del metal, y ya

después al cabo de algunos días (o meses) se presume aver dado el metal la ley, haze el minero lavar dicho metal y yéndose el barro y arena del metal con el azogue, queda como mas pesada en el fondo de la tina aquella massa o pella de plata, y azogue, después se aparta con fuego el azogue de la plata..."

De ésta y otras lecturas se deduce que el proceso de patio consiste en los siguientes y sucesivos pasos: Se inicia el proceso mediante trituración y molienda, luego venía el tamizado y obtención de la "harina", posteriormente se realizaba la formación de montones en un patio, sobre estos se añadía sal (NaCl) previo humedecimiento de la mena molida, posteriormente se ejecutaba la adición de "magistral" y a veces otros reactivos, seguidamente venía el aporte del azogue y la realización de los repasos o trillas de los montones (inicialmente a pie y luego con caballerías) hasta que los minerales de plata se aleaban con el mercurio. Cuando se pensaba que la amalgamación había terminado se pasaba al lavado, echando las tortas a una tina donde, por agitación, separaban las gangas (lamas, relaves, jales, jalsontes, etc.) de la pella o amalgama, luego se desazogaba la pella por destilación y, por último, en las Caxas Reales se fundían los metales desazogados.

Poco después de la puesta en marcha del método de Medina, hacia 1558, Mosen BOTELLER fue llamado desde México para que extrajese mediante amalgamación la plata de los minerales de Guadalcanal, en Sevilla. Todos los datos disponibles (molienda en tina, empleo de vinagre, etc.) llevan a pensar en la aplicación del método de BIRINGUCCIO o variante de éste, y no en la implantación del beneficio de patio. De todas formas, el método de Medina se fue imponiendo con rapidez y ha durado, con pequeños reajustes, más de tres siglos, hasta ser desplazado por los procesos de cianuración.

Los problemas del beneficio de patio consistían en el largo tiempo empleado y en la existencia de unas amplias pérdidas de azogue. Las mejoras realizadas irían por esta línea; según GARCIA TAPIA (1992), PEDRO GONZALEZ y DIEGO DE LEON buscan un sistema para ahorrar mercurio y ALONSO DE ESPINOSA trata que la

incorporación del azogue sea más rápida. Asimismo, se pasa del trabajo en patio, amalgamación en frío, a la amalgamación en caliente, mediante el aporte de calor, a la conjunción de mena y azogue, en artesas, es el método de cajones o buítrones, según probable invento de BERNARDINO DE SANTA CRUZ, mediante el cual se desarrolla con mayor presteza el proceso. Hacia 1560, MARTÍNEZ DE LEIVA alegaba gran reducción de tiempo en la amalgamación, tal vez recurriendo al calentamiento en estufas (método de las estufas). Respecto al otro punto considerado, la recuperación mayor de azogue, hay que resaltar el invento de la capellina o desazogadora, introducida por CAPELLIN, en 1576. También hubo mejoras en la preparación mineral mediante lavado (PEDRO DIAZ DE BAEZA) o molienda (RAIMUNDO DE NAPOLES o PEDRO DE REQUENA). Otros progresos se debieron a la aplicación de nuevos reactivos; JUAN DE SAN PEDRO destaca en el empleo de "magistrales" y PEDRO DE MENDOZA junto a PEDRO GONZALEZ TAPIA (1643) introducen el beneficio de barrilla (o agua de jarillas). Nuevas aportaciones se las debemos a BERRIO DE MONTALVO (1643) y a otros.

#### LA AMALGAMACION DE LA PLATA EN EL VIRREINATO DEL PERU

A finales del XVI, las minas de Potosí (descubiertas en 1545) producían el 50% de la plata mundial y buena parte de la del Virreinato de Perú. Inicialmente se explotaron por fundición; los españoles intentaron obtener el metal sin conseguirlo, siendo los indios mediante la fusión con sus "guayras" o "guayrachinas" y afino posterior los que se encargaron de ello. Como señala PEDRO CIEZA DE LEON (1553): "... porque grandes maestros han intentado de los sacar con fuelles, y no han prestado nada su diligencia; a fin como por todas las cosas pueden hallar los hombres en esta vida remedio; no les faltó para sacar plata..., lo hacían (los incas) con unas formas de barro, del talle y manera que es un albaquero en España, teniendo por muchas partes algunos agujeros o respiraderos. En estos tal ponían carbón y el metal encima (plata de rica ley, con adición de galena que hacía de fundente); y puestos por los cerros o laderas donde el viento tenía mas fuerza,

sacaban del plata, la cual apuraban y afinaban después con sus fuelles pequeños o cañones con que soplaban. Llamen a estas formas guayras, y de noche hay tantas dellas en todos los campos y collados que parecen luminarias...". Recordemos que wayra en quechua quiere decir viento.

En 1558, se envió a Nueva España al portugués ENRIQUE GARCES para que aprendiese el método de patio. A su vuelta se hicieron pruebas con éxito; sin embargo, el proceso de fundición funcionaba bien y no se sustituyó. Inicialmente se sacó mucha plata por este método, pero tal abundancia no duró mucho y se tuvo que introducir la amalgamación. Esto ocurre en 1571 o 1572, de la mano de PEDRO FERNANDEZ DE VELASCO, el cual diseñó, tras conocer las técnicas mexicanas, un beneficio de cajones, mediante amalgama en frío (SERRANO, C., 1994). Pensamos en un procedimiento similar al de las canoas que se realizaba en cavidades alargadas realizadas en el suelo.

En un dibujo ANONIMO, sobre la minería y metalurgia de Potosí, en 1584, de la Hispanic Society of America, comprobamos cómo tras la molienda, mediante almadenetas accionadas por energía hidráulica, se ejecutaba la amalgamación en zanjas, realizándose el lavado posterior de las pellas en tinas. Parece ser que los rendimientos del proceso no debían ser muy buenos, debido a la gran altitud (4146 m) y frío clima de esta población andina, por lo que se pasó enseguida a la amalgamación en caliente, empleando el método de los cajones, tal y como reconoce JOSE ACOSTA, en 1590: "... ponen el azogue en un saco y lo exprimen como rocío, sobre el metal, sobre el fuego con palas...".

El método fue perfeccionándose; así, en 1580, GABRIEL DE CASTRO y posteriormente, en 1586, el clérigo GARCIA-SANCHEZ propusieron el empleo de escorias de hierro, lo que ayudaba a la reducción de los cloruros argentíferos generados en la amalgamación. En 1587, en el valle de Tarapay, CARLOS CORZO Y LLECA y JUAN DE ANDREA, incorporaron hierro molido a un proceso en frío, obteniendo efectos similares que en el caso anterior, pero aumentando notablemente los rendimientos, ya que se ahorra mucho azogue, lo que no

interesaba a la Corona, porque peligraban las rentas de Guancavelica (de todas formas estas mejoras y otras posteriores supusieron un gran "stock" mercurial que llegó incluso a hacer parar, a principios del siglo XVII, temporalmente la actividad de las minas mercuriales peruanas). En 1588, JUAN FERNANDEZ DE MONTANO usa por primera vez los "magistrales" en Perú, empleando en este caso concreto el "copaquiri" o sulfato de cobre (piedra azul de los lipez), aplicado en un procedimiento de buítrones. "Magistral", es un término ambiguo que no obedece a una única formulación, empleándose por los mineros para definir distintas sustancias minerales, tales como sulfatos de cobre, de hierro, de aluminio y otros compuestos (PUCHE, O., 1994). En 1590, ALVARO ALONSO BARBA, autor del *Arte de los Metales* (1640), cuya influencia se dejó sentir por más de dos siglos, inventó el método de cazo y cocimiento, proceso de amalgamación en caliente, realizado en calderos de cobre, mediante agitación mecánica (Lib. III, Cap. I) Fig. 4. En estos calderos se alcanzaban menores temperaturas y las pérdidas eran menores; asimismo, las paletas rotatorias ayudaban a la incorporación del azogue. En 1596, ante la escasez de hierro, DOMINGO GALLEGOS, empleó nuevos reductores para los cloruros de plata, se trata de estaño, cobre y plomo, metales más fáciles de conseguir en la zona.

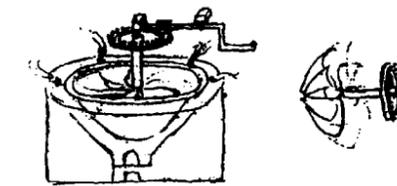


Figura 4. Agitador mecánico para amalgación de Ayanz, según GARCIA TAPIA, N. (1992), este artilugio es anterior al método de cazo y cocimiento de BARBA.

Al aumentar la profundidad de la explotación, cambió la mena su composición y hubo problemas con la amalgamación de los "negrillos". En 1601, el Consejo de Indias solicita a JERONIMO DE AYANZ la resolución del problema, lo que se hizo añadiendo un "magistral" cobrizo y cal. El párroco ALVARO ALONSO BARBA,

nos indica que estos minerales hay que quemarlos para favorecer la molienda, eliminar impurezas y facilitar la incorporación del mercurio, Fig. 5.

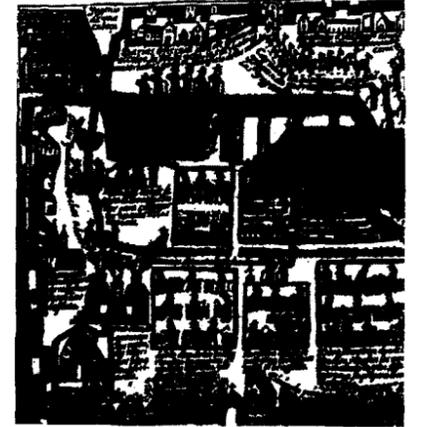


Figura 5. Amalgación en Potosí, según ARZANS y VELA, 1737

Al igual que en Nueva España la molienda se convirtió en algo necesario. En Potosí se organizó un complejo sistema hidráulico, con numerosas presas y canales, cuyas aguas accionaban enormes ruedas motrices de los sistemas empleados para la trituración y molienda.

En los minerales llamados "machacados", a diferencia de los "pacos", la plata nativa no era visible. BARBA (Lib. III, Cap. XVI) nos describe el método de tintín, descubierto por un franciscano, el cual consistía en mejorar la molienda para favorecer la acción mercurial sobre estos minerales.

Los azogeros señalaban la existencia de un consumo fijo de mercurio, en el proceso de amalgamación, que llamaban "consumido", a lo que habría que sumar unas pérdidas variables, de tipo mecánico, que llamaban simplemente "pérdida". Así GERONIMO GARAVITO (1636) nos da un "consumido" de un kilogramo de mercurio por kilo de plata producido, con "pérdidas" en torno al 25% del "consumido". Por supuesto, la cantidad de mercurio añadido lo marcaba la calidad de la mena, pero lo que se trataba era actuar de tal forma que se redujese el porcentaje de "pérdidas".

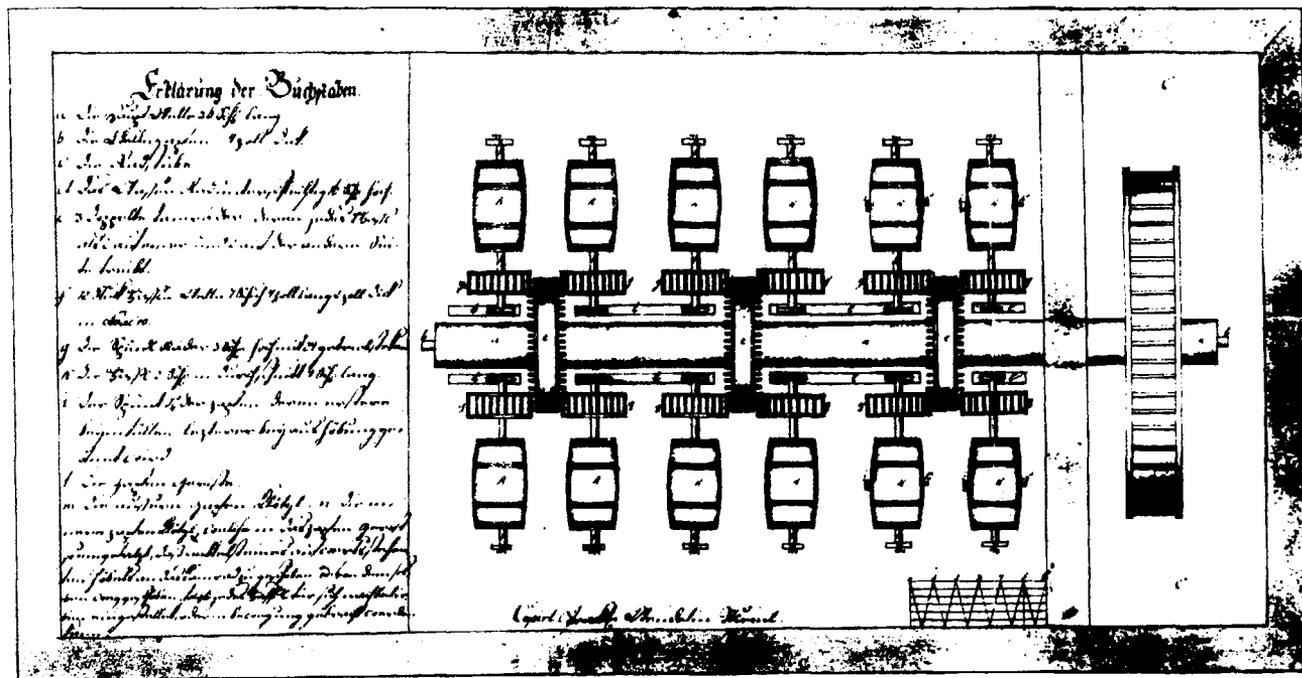


Figura 6. Plano del método de los toneles de amalgamación de IGNAZ VON BORN (1785) (Archivo General de Indias).

ANTONIO ULLOA (1792) reconoce que en muchas ocasiones se debían a una mala preparación de la mena, por no saber eliminar productos nocivos que acompañaban al mineral.

En Europa no hubo innovaciones de interés hasta que IGNAZ BORN (1785) mostrara, en la Casa de la Moneda de Viena y en presencia del Emperador, el célebre **método de los toneles de amalgamación**, donde se trataba de agilizar el proceso mediante la agitación mecánica en toneles. Para HUMBOLDT, WHITAKER y otros autores, BORN no hace más que redescubrir el método de BARBA, Fig. 6.

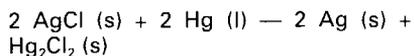
De todas formas, este último procedimiento no pudo ser introducido en América por el barón NORDENFLINCH, FAUSTO ELHUYAR y tantos otros, por diversas causas. Escribe FEDERICO SONNESCHMID (1925), en relación a este tema: **"A lo menos no tengo embarazo en declarar que con diez años de trabajos no he podido lograr introducir ni el beneficio del señor Born, ni otro método preferible al de patio, por mas arbitrios que he empleado... Conviene, por tanto, que se extienda su conocimiento en Europa, para hacer justicia a ese sobresaliente método que la erudición europea ha tratado con bastante**

**desprecio"**. Cuenta JOSE MESEGUER (1949) que las leyes de las menas americanas eran inferiores a las sajonas y, sin embargo, los rendimientos fueron muy elevados, lo que pone en evidencia la excelente explotación realizada. Sospechamos que el método de patio, lento de por sí, permitía, a pesar de todo, el tratamiento de menas de baja ley. El método de BORN daría buenos resultados con leyes mayores, ganando tiempo y productividad en el proceso.

LA QUIMICA DE LA AMALGAMACION DE LA PLATA.

Según nos recuerda ANTONIO ULLOA (1792): **"El beneficio de los metales necesita dos ingredientes fundamentales, que son el azogue y la sal"** Fig. 7.

En el caso de tener plata nativa la amalgamación se produce de forma sencilla, Fig. 8. La adición de la sal trae consigo la formación de cloruro de plata que reacciona exotérmicamente con el mercurio nativo, de la siguiente manera:



Sin embargo, lo normal es que la plata se muestre de otras formas, por ejemplo, como acantita o argentita (Ag<sub>2</sub>S), mineral típico en las menas mexicanas. En este caso, la reacción con la sal es lenta (recordemos la duración inicial del proceso de patio). El resultado final es la formación de un compuesto de plata reducible con mercurio:

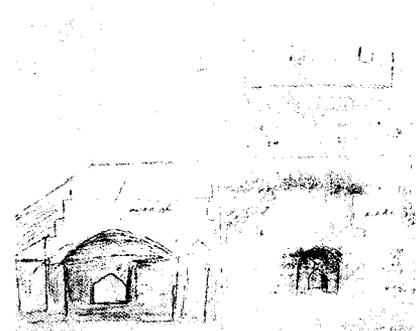
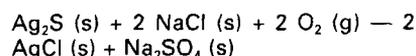


Figura 7. Metalurgia del mercurio en Hancavelica, según TADEUS HAENKE, a finales del XVIII (Archivo Real Jardín Botánico de Madrid).

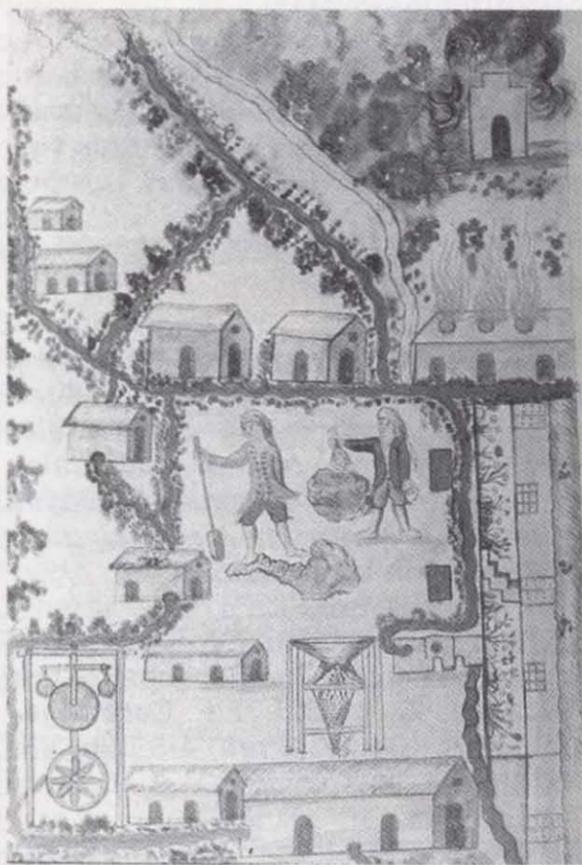
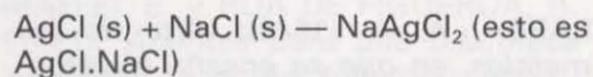


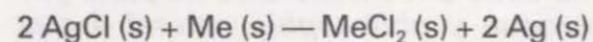
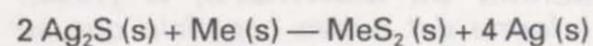
Figura 8. Metalurgia de la plata según dibujo de la colección Castañón (Biblioteca Palacio Real) reproducido por FERNANDEZ PEREZ, J. y MATILLA TASCÓN, I. (1990).

Por supuesto que hay infinidad de posibles reacciones, en función de la gran variedad de minerales presentes, en cada uno de los casos particulares, pero sólo vamos a considerar las situaciones más generales. Así, dentro de este esquema simplificado que se propone tenemos reacciones paralelas a la anterior, tales como la siguiente:



donde podemos apreciar la formación de un compuesto de plata reducible.

Otro de los procedimientos consiste en la aplicación de ciertos metales (hierro, cobre, plomo o estaño), según las reacciones genéricas siguientes:



A finales del XVI, como ya se ha visto en el capítulo anterior, la reducción de

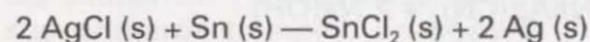
cloruros y sulfuros de plata se logra mediante la adición de hierro. Aunque, desde el inicio, a veces el hierro estaba presente, sin que el operario fuese consciente, tal es el caso de las herraduras de las caballerías (en el beneficio de patio), por la presencia de cajones de hierro, etc. Las reacciones son las siguientes:



Asimismo la adición de plomo, a veces procedente de la propia mena, tal es el caso de los soroche, y el aporte de estaño, suponen procesos de reducción de los sulfuros y cloruros de plata. Estos minerales llegaron a reemplazar al hierro, sobre todo en Perú, por que abundaban más. Las reacciones son las siguientes:



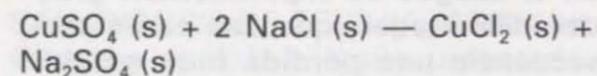
De igual forma ocurre en el caso del estaño:



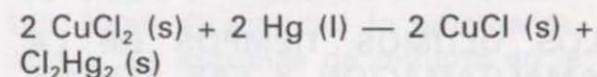
Reacciones similares se obtendrían con cobre nativo. Recordemos que en el método de cazo y cocimiento se emplean calderos de este metal.

Todas estas reacciones con metales (hierro, cobre, plomo o estaño) favorecen la reducción de los minerales argentíferos, como consecuencia que sus potenciales de oxidación normales en agua, a temperatura ambiente (25°C), son mayores que los de la plata. Además son reacciones exotérmicas, su energía libre de Gibbs es negativa, y por tanto son espontáneas. El aporte de estos metales como reductores se tradujo en un aumento notable de las velocidades de reacción, así como en el grado de recuperación de la plata; en consecuencia se incrementó la eficacia del proceso. Según PELAEZ LEYTON (1991), incluso se podía trabajar en condiciones de pH menos ácido, que influye en varios aspectos de gran interés. Así, al ser el pH mas alto, ya no era preciso que la mena cumpliera condiciones notables de acidez, proporcionadas por la exigencia de la presencia de sulfuros de hierro, que bajaban el valor del pH.

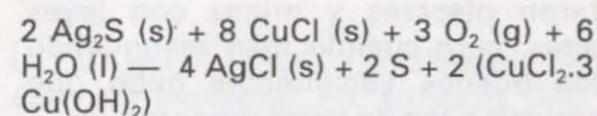
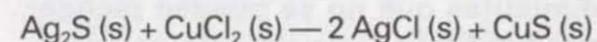
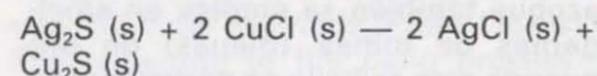
A mediados del XVII, aparece el empleo del magistral, producto secreto, constituido en muchos casos por sulfato de cobre, gran agente oxidante. El cobre acaba como cloruro, mediante las siguientes reacciones:



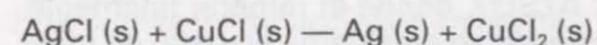
El cloruro formado reacciona con el mercurio produciendo cloruro de cobre monovalente:



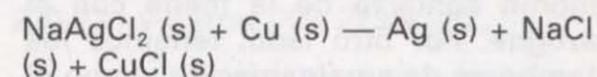
La argentita (o acantita) reacciona con estos cloruros, produciéndose el aislamiento de sulfuros de cobre:



El cloruro de plata formado, en su reacción con el cloruro de cobre, determina la liberación de plata nativa:



El hierro presente intervenía en la reducción del cobre de los cloruros y a su vez este metal ayudaba, como ya vimos, a la reducción de los sulfuros y cloruros de plata:



Cuando no se dosificaba bien el magistral, se podía tener un exceso de iones de cobre, y parece ser que esto era perjudicial. BARBA (Lib II, Cap. V) señala que: **"Las caparrosas...son enemigas del azogue y lo desbaratan..."**.

Por último, señalar que la adición de cal supone variados efectos, uno de ellos regular el pH, pero por otro el hidrato de cal recubre las menas, frenando las reacciones. RIVOT (1872) ha comprobado experimentalmente que: **"La presencia de cal en propor-**

ción notable, 10 por cien o mas, no se opone a la formación de amalgamas, y aun parece que la hace mas rápida, favoreciendo la diseminación del azogue; pero cuando al fin de la operación se trata de reunir las amalgamas en el azogue se experimentan grandes dificultades, que dan como consecuencia una pérdida muy notable del último, y la correspondiente de metales preciosos, que casi es proporcional a la de aquel...".

#### LOS ULTIMOS TIEMPOS DE LA AMALGAMACION Y LAS NUEVAS TECNICAS DE EXTRACCION DEL ORO Y DE LA PLATA

Según señala ULLOA, A. (1792): "El azogue también se emplea en amalgamas de minas (menas) de oro cuando este se halla en partículas tan diminutas que no se pueden recoger por fundición". Inicialmente se explotaron placeres y minas con leyes altas, pero cuando iban menguando los buenos yacimientos hubo que recurrir a los de leyes menores.

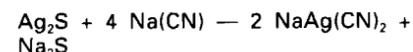
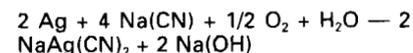
En el siglo pasado se mejoraron las máquinas mecánicas. Destacamos el diseño de molinos amalgamadores de oro como los de CRAWFORD o LAZSLO, donde el mineral finamente molido se amalgama en baño de mercurio mediante agitación mecánica. La ganga escapaba mientras los minerales más densos no podían salir, realizándose una completa reacción Au-Hg. También hay que considerar a las cubas de amalgamación, donde la forma de las aletas mecánicas (aletas de plancha) favorecía el íntimo contacto de la mena con el azogue. Por otro lado, tenemos los tambores de amalgamación, como el de COOK, donde el oro queda retenido, en parte, en chapas de cobre amalgamado, a la salida de los tambores. Placas amalgamadas y pilas mercuriales apuran el proceso.

No entraremos en el tema de tratamiento de las "pellas" o amalgamas de oro o plata. Tenemos los procesos de lavado en tinas (y escurrido o tamizado posterior, empleando telas), inicialmente manuales, luego con agitación mecánica, que dieron más modernamente paso a los lavadores o settlers. También los residuos de los lavadores se tamizaban en sacos o maquetas de lona. Asimismo destacar el empleo de prensas para formar las

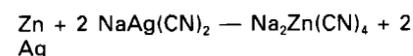
"piñas" o pellas compactas, haciendo salir el mercurio sobrante, y el tratamiento posterior con desazogadoras. Más modernamente las amalgamas se trataban en cubetas de fundición que eran llevadas a hornos de destilación.

En la Edad Contemporánea los procesos de amalgamación fueron sustituidos por otros como la cloración, en caso de menas auríferas libres de Fe, Zn, Pb y Sb, así como por la lixiviación con cianuros. Las reacciones industriales frente a las cuatro fiebres del oro posthispanas: California, Alaska, Sudáfrica y Australia, incentivaron en gran medida la aplicación de nuevos métodos.

En las menas de oro suele haber algo de plata, que se obtiene en los procesos de cianuración como un subproducto. Asimismo, trescientos años después de la aplicación del proceso de patio, se realizaron las primeras concentraciones en molinos de cianuración. En ellos se tratan menas de plata (principalmente plata nativa, argentita o cloruros) de acuerdo con las reacciones siguientes:



La solución cuando es filtrada y separada de la ganga es tratada con Zn o con polvo de aluminio, lográndose la precipitación de la plata, según la reacción siguiente:

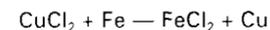


También se han impuesto otros métodos como el proceso Holt-Dern. Se realiza la tostación de la mena, ya preparada, con la adición de sal común. El residuo obtenido se ataca con sal y ácido sulfúrico, formándose cloruros de plata. Se añade cobre nativo y se reduce el cloruro:



plata impura que se refina en fundición.

El cobre añadido se elimina añadiendo hierro:



#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a D. Alberto Navarro Izquierdo y a D. Juan Llamas Borracho sus indicaciones y correcciones, de partes de este trabajo

#### REFERENCIAS

ACOSTA, J. (1590): *Historia Natural y Moral de las Indias, en que se tratan las cosas notables del cielo, y elementos, metales, plantas y animales dellas: y los ritos y ceremonias, leyes y gobierno, y guerras de los indios*. Imp. Juan de León. Sevilla.

AGRICOLA, G. (1556): *De re metallica*. Froben. Basileae. Trad. al español por ANDREU, C. (1992). Ed. Casariego-U.E.E.S.A. Madrid. Pref., 4-5, Lib. VII, 252-253 y Lib. X, 469.

ALFONSO X, REY DE CASTILLA (1982): *El primer Lapidario de Alfonso X el Sabio: edición facsimil del código h-1-15 de la Biblioteca de San Lorenzo el Real de El Escorial. El código y su texto por MARMA BREY, M., con comentarios científicos por AMOROS, J.L. Ciencia en el Lapidario, por AMOROS, J. L., 2 Vol. y 1 complen. Ed. Edilán. Madrid. T. I, 21-21 vuelta y T. Compl., 57.*

AMBROSIANUS, B. (1648): *Ulyses Aldrovandi Patricii Bononinsis Musaeum Metallicum in Libros IIII*. Ed. Marco Antonio Bernia. Bologna.

ARRIBAS JIMENO, S. (1993): El inquieto y desconcertante mercurio. *Química e Industria*, enero, 32-36, marzo 165-169, junio, 52-57 y diciembre, 42-47.

BARBA, A. A. (1640): *Arte de los metales, en que se enseña el verdadero beneficio de los de oro y plata por azogue. El modo de fundirlos todos, y como se han de refinar y apartar unos de otros*. Ed. de 1770, Imp. de la Vda. de Manuel Fernández. Madrid. Lib. I, Cap. XVIII, 34-35, Cap. XIX, 35-37 y Cap. XXIII, 60-61. Lib. II, Cap. V, Lib. III, Cap. I, 105-106 y Cap. XVI, 128-129.

BERRIO DE MONTALVO, L. (1643): *Informe del nuevo beneficio que se ha dado a los minerales de plata por azogue y philosophia natural á que reduce el methodo y arte de la minería, para escusar a todos la pérdida y consumido de azogue ya los artimo-*

*niosos, con las causas de que procede, que hasta hoy no se han alcanzado, de que resultará mayor ley de plata, y ahorro de costa; y poderse dar fundición a los metales secos sin perderse liga de plomo, ni el cosumido ordinario de la greta, ó almartaga*. México. Imp. Santo Officio.

BIRINGUCCIO, V. (1543): *De la Pirothecnia*. Ed. inglesa de SMITH C. S. y GNUDI, M. T. (1942), Lib. IX, Cap. XII.

CARDENAS, J. (1591): *Primera parte de los problemas, y secretos maravillosos de las Indias*. Casa de Pedro Ocharte. México. Lib. III, Cap. 2. Reimp. Alianza Ed., 1988, Madrid. 282 pág.

CIEZA DE LEON, P. (1553): *Primera parte de la Crónica del Perú, que trata la demarcación de sus provincias, la descripción de ellas, las fundaciones de las nuevas ciudades, los ritos y costumbres de los Indios, con otras cosas extrañas dignas de saberse*. Imp. Casa Martín Montedoca. Sevilla.

GARAVITO, G. (1636): *Memorandum al Rey*. Brit. Lib. 1324.k.5 (23).

GARCIA TAPIA, N. (1992): *Del Dios del fuego a la máquina de vapor. La introducción de la técnica industrial en Hispanoamérica*. Ed. Ambito. Madrid. Pág. 235.

ESCOSURA, L. (1878): *Historia del tratamiento metalúrgico del azogue en España*. Ed. Escuela Especial de Ingenieros de Minas. Imp. y Fund. M. Tello. Madrid.

MAFFEI, E. y RUA DE FIGUEROA, R. (1871): *Apuntes para una biblioteca española de libros, folletos y artículos, impresos y manuscritos, relativos*

*al conocimiento y explotación de las riquezas minerales y a las ciencias auxiliares*. Imp. J. M. Lapuente. Madrid. Reed. Cat. de San Isidoro de León, en *La Minería Hispana e Iberoamericana*, V. II, 14-18 y 128-129 y V. III, 245-246.

MESEGUER PARDO, J. (1949): El esfuerzo minero y metalúrgico de España en el Nuevo Mundo. *Bol. R. Soc. Geográfica*, V. XXXV, 339-369.

MONTESINOS, F. (1642): *Anales del Perú*. Reed. en 1906 por Victor Maurtus. V. II, pág. 56.

PELAEZ LEYTON, J. (1991): El proceso de Bartolomé de Medina y su desarrollo en Potosí. *Bol. Soc. Geogr. Potosí*, 14, 16-43.

PLINIO, C. (Siglo I): *Historia Natural*. Trad. y com. por GERONIMO DE HUERTA, en 1629. Imp. Juan González. Madrid. Lib. XXXIII. Cap. VI, pág. 592 y Cap. VIII, pág. 595.

PUCHE, O. (1994): Influencia de la legislación minera, del laboreo, así como del desarrollo técnico y económico, en el estado y producción de las minas de Huancavelica, durante sus primeros tiempos. En *Minería y metalurgia. Intercambio tecnológico y cultural entre América y Europa durante el período colonial español*, 437-482. (Ed. CASTILLO, M.) en Ed. Muñoz Moya Monraveta. Sevilla-Bogotá.

PUCHE, O. (in litt.): La obra minera del Rey Sabio y las explotaciones de su tiempo. *I Jorn. sobre Minería y Tecnología en la Edad Media Peninsular*. León. Sep. 95.

PUCHE, O. y BOSCH, J. (in litt.): Apuntes sobre la minería visigótica. *I Jorn. sobre Minería y Tecnología en*

*la Edad Media Peninsular*. León. Sep. 95.

RIVOT, M. L. E. (1872): Nuevo tratamiento de las menas de oro y plata. *Revista Minera*, 23. Pág. 241.

SAN ISIDORO DE SEVILLA (634): *Las Etimologías*. Ed. bilingüe preparada por OROZ, J. y MARCOS CASQUERO, M.A. (1994). B.A.C. Madrid. Pág. 305.

SERRANO, C. (1994): Transferencia de tecnología y relaciones de intercambio. Caso de estudio: la amalgamación y las escuelas de minería en la colonia. *Papers XVIII INHIGEO Congress*. Geol. Sci. in Latin American. Campinas. Brasil. pág. 202.

THOMPSON, J. V. (1991): Silver recovery by older methods. From "forest fire" smelting to the patio process. The fascinating metallurgy of cindarella metal. *E. & M. Journal*. Jun.-91, 39-41.

ULLMANN, F. (1955): *Enciclopedia de Química Industrial*. Ed. Gustavo Gilli. Barcelona. V. VII. Sec. IV, 404-407.

ULLOA, A. (1792): *Noticias americanas: entretenimientos físico-históricos sobre la América meridional y la septentrional oriental de los territorios, climas y producciones en las tres especies vegetal, animal y mineral; con su relación particular de los indios de aquellos países, sus costumbres y usos, de las petrificaciones de cuerpos marinos, y de las antigüedades. Con un discurso sobre el idioma, y conjeturas sobre el modo con que pasaron los primeros pobladores*. Imp. Real. Madrid. Entret. XIV, 220-221 y Entret. XV, 223 y 232.

VENUCOPAL, B. y LUCKEY, T. D. (1978): *Metal toxicity in Mammals*, 2. Plenum Press, pág. 86.