

MANUEL SILVA SUÁREZ, ed.

**TÉCNICA E INGENIERÍA
EN ESPAÑA**

I

EL RENACIMIENTO
De la técnica imperial y la popular

Alicia Cámara Muñoz	M. ^a Jesús Mancho Duque
Jordi Cartaña i Pinén	Pedro Mora Piris
Fernando Cobos Guerra	Fernando Sáenz Ridruejo
Jesús Criado Mainar	Julio Sánchez Gómez
Mariano Esteban Piñeiro	Manuel Silva Suárez
Nicolás García Tapia	M. ^a Isabel Vicente Maroto
Miguel Á. Granada Martínez	Siro Villas Tinoco
Alexander G. Keller	

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA
INSTITUCIÓN «FERNANDO EL CATÓLICO»
PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA

Publicación número 2.829
de la
Institución «Fernando el Católico»
(Excma. Diputación de Zaragoza)
Plaza de España, 2 • 50007 Zaragoza (España)
Tels.: [34] 976 288878/79 • Fax [34] 976 288869
ifc@dpz.es
<http://ifc.dpz.es>

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA SUÁREZ, Manuel
El Renacimiento: De la técnica imperial y la popular / Manuel Silva Suárez. —
Zaragoza: Real Academia de Ingeniería : Institución «Fernando el Católico» :
Prensas Universitarias, 2008

760 p. : il. ; 24 cm. — (Técnica e Ingeniería en España ; I)
ISBN: 978-7820-XXX-X

1. Ingeniería-Historia-S. XVI y XVII. I. SILVA SUÁREZ, Manuel, ed. II. Institución
«Fernando el Católico», ed.

© De los textos, sus autores.

© De la presente edición, Real Academia de Ingeniería, Institución «Fernando el Católico»,
Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008.

Cubierta: Diversos modelos de alambiques recogidos por Miguel Agustí en el libro
Secrets d'Agricultura, casa rústica i pastoril (Barcelona, 1617). El uso más
común de estos ingenios era la destilación de licores. No obstante, con el
objetivo de conseguir restaurativos medicinales, también se empleaba para
conseguir extractos de flores, cortezas, frutas y raíces, e incluso de animales
como ranas, garzas, babosas u hormigas.

Contracubierta: Para romper una pieza defectuosa de artillería se construía un peque-
ño horno con el que se le calentaba por el lugar deseado. Una vez alcanza-
da la temperatura adecuada se rompía con golpes de maza. Con objeto de
avivar el fuego se solía emplear una pareja de barquines como los mostra-
dos. (*Discurso del Capitán Cristóbal Lechuga, en que trata de la Artillería y
de todo lo necesario a ella con un tratado de fortificación y otros adverti-
mientos*, Milán, 1611; fig. 27).

ISBN: 978-84-7820-814-2 (obra completa)

ISBN: 978-84-7820-975-0 (2.ª edición ampliada del volumen I)

Depósito Legal: Z-XXXX-08

Corrección ortotipográfica: Marisancho Menjón y María Regina Ramón

Maquetación: Littera

Impresión: ARPI Relieve, Zaragoza

IMPRESO EN ESPAÑA - UNIÓN EUROPEA

13

La minería

Julio Sánchez Gómez
Universidad de Salamanca

El siglo xvi supone el renacimiento de las actividades mineras tras el abandono en que caen las grandes explotaciones romanas en el Bajo Imperio. Es cierto que hubo minas en los dominios islámicos y que los fueros locales castellanos hacen referencia a veces a trabajos mineros, lo que indica que algún trabajo se realizaba. Está bien documentada, desde luego, la extracción de hierro en el País Vasco, en los alrededores de los Pirineos y en otros puntos, sin que se tengan apenas noticias de la continuidad de los trabajos ni de las cantidades que se producían; está constatada también en documentación bajomedieval la elaboración de productos como la galena para alfarería —el llamado «alcohol»—. Pero siempre se trató de trabajos muy simples, puros agujeros que se abandonaban cuando se llegaba a una profundidad que complicaba la explotación. Verdadera minería, en el sentido de labores complejas para extraer productos minerales, no hubo en realidad antes del siglo xvi.

Esa centuria va a ver la constitución por vez primera de un sector minero en manos de la Real Hacienda, que para ello desarrollará un principio legal surgido en la Baja Edad Media —con las Partidas y el Ordenamiento de Alcalá— y no utilizado hasta entonces. Con este sector minero real coexistirá una minería en manos privadas de un extremo raquitismo, si se excluye la producción de hierro vasco y la de alumbre del sureste, ambas tomadas como conjunto.

Será la década central del siglo xvi la de la restauración minera hispana. Coinciden entonces una serie de factores, de los que dos son especialmente destacables. Ambos favorecen el que la Corona fije su atención en el sector minero: por una parte, la difusión por América del procedimiento de amalgamación de plata con mercurio, que hace imprescindible la renovación de Almadén como fuente, entonces única, de producción de este ingrediente; y, por otra, el descubrimiento de la mina de Guadalcanal, un auténtico meteoro productivo que en un tiempo corto produjo una cantidad tan considerable de plata que hizo concebir esperanzas a la administración real de convertirla en una fuente fundamental de ingresos para la Real Hacienda.

La renovación se produjo sobre todo como consecuencia de la acción de técnicos procedentes del área germánica, que fueron contratados por la Corona y que importaron las técnicas avanzadas comunes en la Europa central. La Península Ibérica se convertirá con ello en el puente de transmisión de las innovaciones en minería y metalurgia hacia la actividad minera mucho más importante de América, así como, más tarde, cuando América comience a crear sus propias técnicas minerometalúrgicas, Europa recibirá esas novedades a través de la parte europea del Imperio.

Pero la renovación de la minería se quedará muy corta en los dominios peninsulares. Afectará solo a la efímera mina de Guadalcanal y en menor grado a la de Almadén y a algunas minas menores del entorno de Sierra Morena; toda una serie de factores incidirá en que la técnica renovada no vaya más allá de estas dos empresas: por un lado, el incremento de costes que se produce en el último tercio del siglo hace inviables muchas explotaciones y, por otro, el grado de profundidad a que había llegado la mayoría de las minas conocidas ya en la época romana hacía que su vuelta al trabajo se convirtiera en económicamente inabordable. Sí tuvo, sin embargo, importancia a largo plazo la renovación de mediados de la centuria en el caso americano.

La fluida relación establecida por la minería hispana con la ultrapirenaica se verá interrumpida en los años 70, cuando el temor de la monarquía al contagio protestante del Norte levante barreras infranqueables entre la Península y el mundo germánico afectado por la herejía. A partir de 1575 solo llegarán a España técnicos procedentes de los dominios de Su Majestad Católica, Flandes o Italia sobre todo. Hasta 1750 no volverá a abrirse la minería peninsular a la relación con la Europa del norte, en un intento por volver a colmar el vacío técnico que el aislamiento había producido durante casi dos siglos.

I

LA DEMANDA DE PRODUCTOS EXTRACTIVOS EN EL MUNDO RENACENTISTA

La actividad extractiva y de transformación de bienes del subsuelo dirigía su atención, a fines del siglo xv, a un conjunto de productos mucho menor que el que se conoce hoy. Aparte de los productos extractivos no metálicos —pizarra, caliza, mármol, etc.— usados en construcción y alfarería, eran utilizados desde la Antigüedad el hierro, el cobre, el plomo, el estaño, el oro, la plata y el mercurio entre los metales. Los combustibles minerales, conocidos desde la Baja Edad Media en zonas muy restringidas de la Europa Occidental, empiezan a hacer progresos desde fines del siglo xvi en el norte del continente europeo frente a la madera. Se saca provecho de la aguda crisis forestal de zonas como Inglaterra o los Países Bajos y la ventaja de que, a diferencia de aquella, son de uso directo y no precisan transformación previa.

Ciertos metales no bien conocidos eran utilizados a lo largo de esta centuria, si bien solo más tarde fueron plenamente distinguidos de otros. Es el caso del arsénico, usado en aleaciones por los egipcios, pero que no es descrito como un produc-

to diferenciado hasta mediados del siglo xvii, si bien compuestos suyos como el rejalgar o el oropimente se utilizaban con frecuencia. O el del bismuto, empleado ya en el siglo xv en aleaciones para tipos de imprenta, mencionado por Agricola y Álvaro Alonso Barba como un elemento diferente del estaño y el plomo, pero que será reconocido como un metal distinto en el siglo xviii. Algo semejante ocurría con el zinc¹ o con el antimonio, empleado, no sin polémica, para usos médicos y mencionado como elemento diferenciado por primera vez en esta centuria, así como el cadmio, utilizado en aleaciones de bronce, y el cobalto, conocido en el siglo xv como «azul» y usado en tintes y cerámica, pero que solo en el siglo xviii es perfectamente diferenciado. Una parte de estos productos fue conocida solo en círculos restringidos y su producción fue muy limitada. La actividad minero-metalúrgica se dirige sobre todo a la obtención de los siete metales citados al principio, quedando los últimos casi como meras curiosidades.

En relación con la demanda, es preciso hacer algunas precisiones. Los metales se ubican en el consumo en un lugar incomparablemente menor en términos relativos que el que ocuparán después del siglo xix y se sitúan a gran distancia de la producción agraria y textil, únicas actividades que podían considerarse de primera necesidad. Hasta fines del siglo xviii, Europa y, aún más, América tenían una capacidad muy limitada para la industria metalúrgica y de transformación metálica antes del uso generalizado del carbón mineral, del hierro fundido y el acero o del cobre en fundiciones a escala significativa; solo adquirirán una capacidad suficiente cuando se produzca un tirón importante de la demanda, tras la aparición de las máquinas y los barcos de vapor, las líneas férreas y la extensión de la máquina como herramienta de trabajo. Es cierto que a lo largo del siglo xvi se produce un desarrollo de cierta importancia de la máquina, potenciado por la invención de nuevos sistemas de transmisión del movimiento; se inventan máquinas de desagüe, de laminar, fabricar planchas y barras de metal, etc., hasta el punto de hablarse por algunos especialistas de «primera mecanización», en el caso de la minería. Pero es la madera el material básico de las máquinas y la transmisión de la energía se hará con cuerdas con mucha más frecuencia que con cadenas.

La demanda no fue estática en el siglo xvi. Aumenta de forma constante el uso del metal a lo largo de la centuria e ingresan sujetos demandantes prácticamente nuevos, como las monarquías, cuyo papel no había sido relevante hasta fines del siglo xv, pero que ahora se convierten en consumidores importantes, en el proceso de afirmación progresiva de su poder y de su capacidad para recaudar impuestos y succionar recursos ajenos, que destinarán a actividades bélicas, acuñación o construcciones suntuarias, todas ellas prácticas consumidoras de productos minerales. Triunfan de forma definitiva las armas de fuego, que en el siglo xvi se fabrican de

¹ Importado de China y la India e incluso extraído en algunas zonas europeas como «peltre» para producir latón, no era reconocido en el siglo xvi como metal.

bronce —el hierro colado es aún un producto incipiente y poco conocido hasta el siglo siguiente— y que, además, emplean plomo como munición y pólvora, un producto ligado también a la actividad extractiva, al emplear azufre como uno de sus compuestos.

La acuñación de moneda fue otra de las actividades vinculadas al poder real que demandaba cantidades significativas de metales. A partir del siglo xv la economía dineraria avanzó progresivamente en Europa occidental, estimulada por el auge del comercio. La exigencia del pago de transacciones en moneda capilariza la sociedad entera, lo que se traduce en una exigencia cada vez mayor de medios de pago, que entonces eran fundamentalmente en metálico. Los metales de que se fabricaban las monedas persistieron sin cambios en Europa durante centurias y el continente permaneció fiel al sistema ternario oro-plata-cobre como materias primas únicas, un sistema que España exportó a América, si bien el Nuevo Continente no conoció la explosión de la moneda de cobre que en la parte europea de los dominios de los Habsburgo comenzará al final del reinado de Felipe II.

Junto a estos dos grandes insumos, un conjunto de actividades de carácter tanto estatal como privado consumían también productos extractivos. Algunas, como la construcción, se nutrían prácticamente del autoconsumo en pequeñas canteras locales de piedra, yeso o mármol. Otras, como las obras públicas, aumentan el uso de metales como el plomo, que en cañerías de distribución va desplazando al barro y la madera, mientras que en los hogares se van introduciendo calderas y cacerolas de cobre y otros utensilios de estaño, latón y peltre; asimismo, hay objetos de cerámica vidriada, en cuya decoración entraban también derivados minerales; y en las casas de mayor poderío económico, la rejería, el vidrio, la porcelana, los espejos o los apliques metálicos de algunos muebles consumían igualmente productos extractivos. No puede olvidarse tampoco que en la actividad constructiva de grandes edificios —palacios, iglesias importantes— el metal formaba parte significativa, por ejemplo en el cubrimiento de tejados con grandes planchas de plomo; en el caso español, por ejemplo, la actividad edificadora en El Escorial, Aranjuez y Toledo durante el reinado de Felipe II llegó a absorber una parte importante de la producción de las minas de Linares.

El auge económico en Europa a partir de 1500 provoca el nacimiento de actividades transformadoras y un incremento de la producción de algunas ya existentes. Tal incremento viene posibilitado en parte por la aparición de máquinas con nuevas técnicas que se transmitirán —sin modificaciones o apenas— a la Revolución Industrial. Aparecen máquinas, como las de hacer tornillos, agujerear o laminar, que abren nuevas posibilidades al uso de metal, incrementando su demanda. Las propias máquinas se construirán en la mayor parte de sus piezas con madera, dejándose el metal solo para las que precisaban mayor resistencia al frotamiento; hasta el siglo xviii, las partes metálicas no predominarán en la construcción de tales aparatos.

De mucha menor entidad es la demanda de productos minerales relacionados con la medicina y la veterinaria. Aunque la utilización de compuestos metálicos era

conocida tanto en la Antigüedad como entre los musulmanes, su incremento en medicina se produce en relación con la extensión de la iatroquímica y la difusión de la escuela paracelsiana a partir de la primera mitad del siglo xvi, si bien las resistencias que frente a ellas aparecen solo permiten hablar de un triunfo abierto a fines del siglo xvii. La medicina utilizó compuestos de galena, azufre, bórax, caparrosa, vitriolo, plata, potasio, arsénico, antimonio, hierro y mercurio como remedios, en cantidades crecientes a lo largo del periodo.

II

LA RESPUESTA A LA DEMANDA

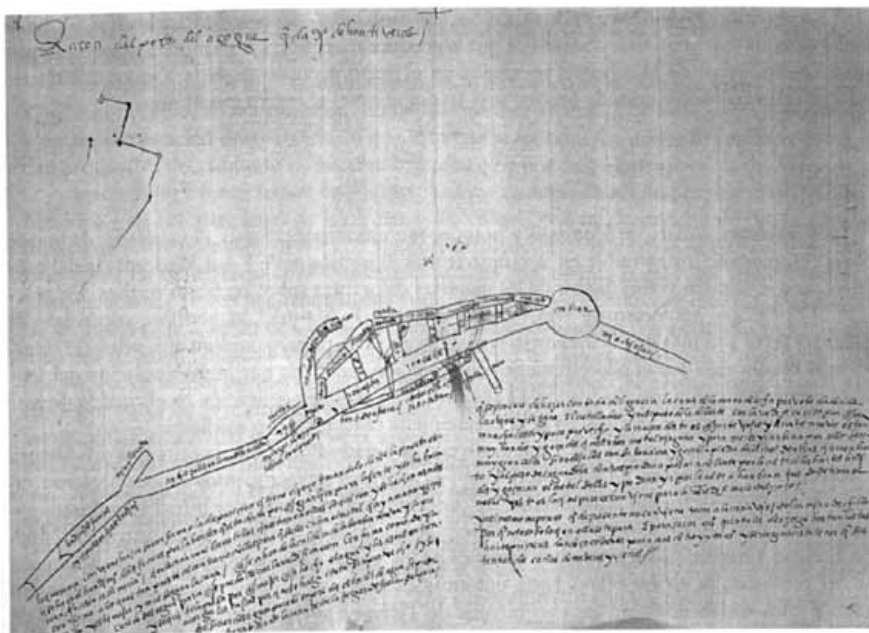
II.1. *La minería española, 1500-1550*

¿Cómo hacía frente a la demanda de minerales la actividad minera en el lado peninsular del imperio antes de 1550? Existió un número muy limitado de explotaciones, ubicadas en Sierra Morena, la franja cantábrica y los Pirineos —hierro—, a las que habría que añadir los minúsculos trabajos destinados a extraer estaño en la franja que se extiende desde Cáceres al interior de Galicia.

La más importante era la mina de Almadén, explotada en época musulmana para extraer pequeñas cantidades de mercurio, que se utilizaba para usos médicos y de joyería y para fabricar bermellón. Su propiedad había recaído en la Real Hacienda a comienzos del siglo xvi, que la explotará hasta 1525, cuando el emperador inicie una serie de cesiones a grandes comerciantes y banqueros extranjeros que se prolongará durante más de cien años. De entre ellos destacarán los Fugger, que eran ya empresarios mineros en Europa central².

En la primera mitad del siglo, las técnicas extractivas empleadas en Almadén eran muy sencillas. Excepcionalmente para el caso español, se había superado en esta mina el simple pozo vertical y ya desde fines del siglo xv se había abierto una galería horizontal para unir las diversas bolsas con riqueza metálica. En la década de 1540, su estructura consistía en una galería horizontal de unos 160 m a unos 30 de profundidad máxima; en el centro se abría un pozo hasta la superficie que servía de ventilación y acceso a los trabajadores. Se trata de una estructura —galería y pozo— de enorme simplicidad. El problema del desagüe se resolvía por medio de bombas hechas de cuero, a las que se hacía funcionar a mano. Junto a las bombas se empleaba un sistema aun más rudimentario, al que se recurría cuando la afluencia del agua

² En relación con la historia de la mina de Almadén desde la Baja Edad Media hasta fines del xvii, vid. A. MATILLA TASCÓN: *Historia de las minas de Almadén*, Madrid, 1958-88; J. ZARRALUQUI: *Los almadenes del azogue. La historia frente a la tradición*, Madrid, 1934; J. FERNÁNDEZ PÉREZ e I. GONZÁLEZ TASCÓN (eds.): *Agustín de Betancourt. Memorias de las Reales Minas de Almadén*, Madrid, 1990.



13.1. Plano de Almadén, en 1553 (Archivo General de Simancas).

de lluvia hacía insuficiente el anterior: el acarreo a base de elevación con un torno manual, maromas y zacas de cuero, que era también el procedimiento habitual para extraer el mineral hasta el exterior. El otro procedimiento para extraer agua de las minas, la práctica de galerías subterráneas de desagüe, no existió en Almadén, ni en ninguna otra mina en España, antes de 1550.

El arranque de mineral se efectuaba valiéndose de herramientas de hierro: picos, barrenas, cuñas, etc. El mineral se machacaba *in situ* y se elevaba a la superficie. Para evitar el hundimiento de las galerías se recubrían los pozos con piedra y se entibaban con madera.

La metalurgia del cinabrio para obtener mercurio se realizaba mediante un procedimiento utilizado al menos desde la Baja Edad Media. El mineral desmenuzado se introducía en unos hornos denominados «xabecas», rematados en forma de bóveda redonda. En esta había un número variable de agujeros —entre 18 y 24— sobre los que se colocaban unas ollas invertidas en las que se introducía el mineral envuelto en cenizas húmedas. El fuego del horno hacía destilar el mercurio, que quedaba recogido en un lecho de ceniza que ocupaba la parte superior, de donde se retiraba tras el enfriamiento del horno³.

³ La mejor descripción gráfica de los hornos de xabecas aparece en la obra de Álvaro ALONSO BARBA: *Arte de los metales*, Madrid, 1640 (ed. facsímil, Valencia, 1993).

A comienzos del siglo XVI, la producción de Almadén era escasísima: entre 1503 y 1506 se extrajeron 111 quintales anuales. Cuando los empresarios extranjeros tomaron la mina en sus manos, se incrementó notablemente: en los años 40 se extraían entre 800 y 1.000 quintales por año, aunque la escasa demanda de mercurio acabó provocando problemas de acumulación de *stocks*.

Fuera de Almadén, el panorama era del más puro primitivismo. La propiedad del subsuelo estaba asignada a la Corona, aunque esta apenas había hecho efectivo este derecho, y una buena parte del subsuelo del reino se había cedido como merced a nobles y burócratas que no se habían interesado en ponerlo en explotación.

En conjunto, la producción más importante de los reinos hispánicos era la de hierro, que permitía su exportación a Europa. La extracción más abundante se producía en la cornisa cantábrica oriental, seguida por el entorno de los Pirineos. Fuera de este ámbito, pequeñísimas vetas férricas se explotaban un poco por todas partes. Las explotaciones de hierro se beneficiaban tradicionalmente sin necesidad de previo permiso de la autoridad real, a diferencia de las demás venas metálicas.

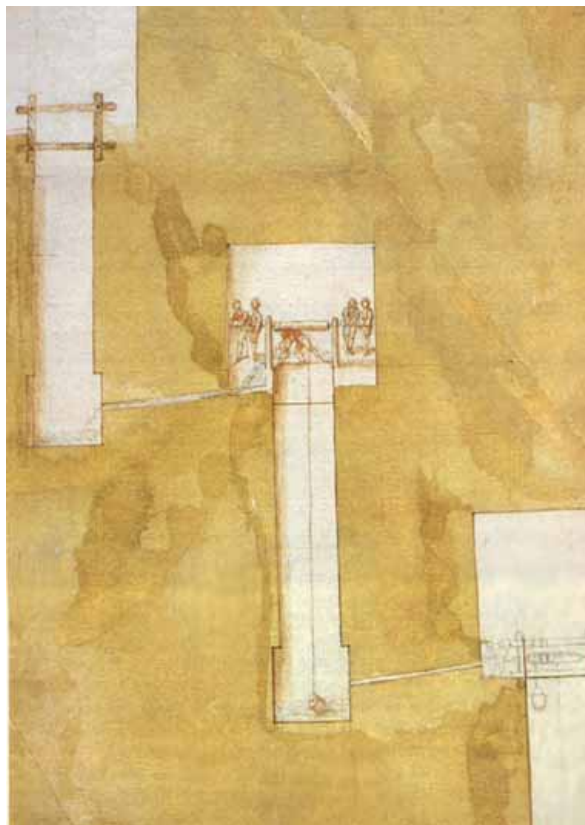
Junto al hierro se trabajaban diversas vetas de plomo, algunas con pequeños contenidos argentíferos, al norte de Sierra Morena (desde Almodóvar del Campo hasta la comarca de la Serena, pasando por el valle de Alcudia) y, en la vertiente sur, en Fuenteovejuna, Hornachuelos y Alcaracejos, en los alrededores de Linares y también en algunos puntos de Guipúzcoa, en la sierra de Segura y en el valle bajo del Bidasoa. La producción conjunta de todas ellas era muy poco notable. Por último, esporádicos y microscópicos trabajos para extraer estaño tenían lugar desde Extremadura a la Galicia oriental⁴.

La técnica extractiva era de una enorme simplicidad. Se reducía a abrir agujeros verticales hasta las vetas y abandonarlos en cuanto la profundidad dificultaba el trabajo, para abrir otro contiguo. En muchas ocasiones, la explotación consistía en el trabajo de escoriales antiguos de minas abandonadas desde la época romana; esas minas no podían trabajarse sin técnicas entonces no introducidas en España, por la profundidad en la que se encontraban.

La fundición se realizaba, en el caso del plomo —solo se trataban óxidos y sulfuros—, en pequeños hornos cuadrangulares muy simples, abiertos por la parte superior y con un orificio en la inferior por el que salía el material en estado líquido; había un contacto directo entre el mineral y el combustible, habitualmente leña. Cuando el mineral de plomo contenía plata, se desplataba en un horno de copelación que se denominaba «fuslina». No existía ningún tipo de mecanización y el aire necesario para activar la combustión se insuflaba por medio de fuelles movidos a mano.

En el caso del hierro, los hornos eran también de pequeño tamaño, si bien en este caso, ya desde el siglo XIV, muchas ferrerías cantábricas se habían dotado de ingenios de agua, tanto para mover los fuelles como para activar los grandes mazos

⁴ Vid. Julio SÁNCHEZ GÓMEZ: *De Minería, Metalurgia y Comercio de Metales*, Salamanca, 1989.



13.2. Torno de achicar agua en las minas de Almadén con zacas de cuero (1674). Los operarios llevan una vestimenta roja que denota que son forzados que cumplían condena trabajando en la mina (los tornos son exactamente iguales que los del siglo XVI). Archivo General de Simancas, M.P. y D., VII-44.

que golpeaban el hierro extraído de los hornos⁵. Todo ello supone una doble transformación: por un lado permite la obtención de hierro de forja y acero de cementación a mucho mayor escala y de forma menos penosa y, por otra, va abriendo el camino a la fusión del hierro en los futuros altos hornos. Hay referencias a ferrerías con mecanismos de agua o martinets en el siglo XIV en Legazpi (Guipúzcoa), que a lo largo de los siglos XV y XVI se van extendiendo a otras ubicaciones. Estos martinets movían piezas de gran tamaño y peso —hasta de 200 kg—, permitían forjar piezas de grandes dimensiones y de geometría delicada, como anclas o rejeras artísticas, y no cayeron en desuso hasta la aparición, ya casi a mediados del XIX, del martillo pilón a vapor.

Los fuelles eran movidos con ruedas hidráulicas, que también podían accionar fuelles mediante un sistema de bielas, si bien el soplado podía producirse con un sistema llamado «de trompas», muy utilizado en las forjas pirenaicas, pero de mucho menor éxito en las cantábricas, y que consistía en el aprovechamiento de la

⁵ IGNACIO GONZÁLEZ TASCÓN: *Fábricas hidráulicas españolas*, Madrid, 1987.

corriente de aire que se produce al desplazarse este de un depósito al entrar una corriente de agua⁶.

Eran desconocidos en España, en 1550, los nuevos procedimientos, máquinas y hornos descritos por Agricola⁷ y que resultaban corrientes en la segunda mitad del siglo xv en la Europa central. La insuficiencia técnica acarrea graves consecuencias: desde la inexistencia de producción de cobre a la escasa extracción de cualquier otro mineral —excepto la de hierro o la de azogue—, ante la incapacidad de hacer frente a los retos que planteaba la mínima profundización, lo que obligaba a abandonar numerosas minas en plena producción.

II.2. *El nacimiento de la minería americana*

La importancia de la ávida búsqueda de metales preciosos en la conquista y colonización del continente americano ha sido ya destacada; basta con leer los diarios de Cristóbal Colón y la abrumadora repetición en ellos de la palabra «oro» para comprobarlo. Oro y plata serán, primero, el principal estímulo de los descubrimientos y la expansión americana, después, de la progresiva incorporación de territorios y más tarde se convertirán en el núcleo del sistema colonial⁸.

Sin embargo, la extracción y el trabajo de metales no comenzaron con la llegada de los españoles. Los indígenas habían extraído y utilizado metales, especialmente los pueblos de las grandes culturas del ámbito andino-peruano y mexicano. En el área de las Antillas no se conocían otros metales que el oro extraído por el lavado de las arenas de los ríos. Es dudoso que conocieran la plata y desconocían el trabajo de los demás metales. En el continente, los estudios arqueológicos han demostrado que las prácticas minerometalúrgicas y el uso de los metales fueron anteriores en el área andina que en la mesoamericana; en una y otra, los indígenas excavaron túneles y galerías, emplearon el fuego para ablandar las rocas duras, utilizaron para el derribo herramientas de piedra, de cobre o de maderas muy duras.

Más conocidos son los procedimientos metalúrgicos. En el área andina, los minerales con contenido en plata se sometían a procesos de fundición y refinación. El primer tratamiento se llevaba a cabo en un horno denominado «guayra», que se haría luego famoso en el Potosí, que operaba aprovechando la fuerza del viento a

⁶ Hoy es posible contemplar mecanismos de rueda hidráulica o de trompas en ferrerías muy bien reconstruidas y convertidas en museos. Por citar algunas, son de gran interés las de Compludo (León), Mirandaola y Legazpi (Guipúzcoa) y farga Rossell en Ordino (Principado de Andorra).

⁷ Georg AGRICOLA: *De Re Metallica*, traducción española Madrid, 1972.

⁸ En relación con la minería americana, vid. Julio SÁNCHEZ GÓMEZ: *Minería y Metalurgia en la Edad Moderna*, en *Historia de la Ciencia y de la Técnica Akal*, Madrid, 1997; Julio SÁNCHEZ GÓMEZ, Guillermo MIRA DELLI ZOTI y Rafael DOBADO GONZÁLEZ: *La savia del Imperio*, Salamanca, 1998; Ramón SÁNCHEZ FLORES: *Historia de la tecnología y la invención en México*, México, 1980; Elías TRABULSE: *Historia de la Ciencia en México*, México DF, 1983, además de las numerosas informaciones que proporcionan los cronistas.

través de una serie de orificios en su superficie, mientras que la refinación —separación de la plata— se practicaba en hornos de refinar en los que se soplabla por medio de toberas de cobre, madera o caña.

Las más desarrolladas culturas precolombinas conocieron y trabajaron oro, cobre, estaño y plomo y practicaron aleaciones, mientras que el mercurio no fue objeto de aplicaciones, salvo la utilización del cinabrio en polvo para pintura facial. El hierro fue, sin embargo, desconocido. Fue en el trabajo posterior de los metales en lo que destacaron los pueblos precolombinos, especialmente en la joyería, de la que dejaron piezas que produjeron admiración en la Europa del siglo xvi y el estu-por de un tan reputado especialista como Alberto Durero.

La minería colonial será heredera de dos tradiciones minerometalúrgicas, la europea y la indígena americana. Las técnicas indígenas, que tienen un peso importante en los primeros momentos, retroceden poco a poco frente a las transferencias de técnicas europeas, sobre todo a partir de 1550, hasta que a fines de siglo el peso de la herencia precolombina va convirtiéndose en residual.

Los cincuenta primeros años de penetración de los españoles en América se caracterizarán por una minería muy primitiva. A la extracción y tratamiento de minerales se aplicarán procedimientos en parte recibidos de España y en parte heredados de la tradición precolombina, en un proceso de aculturación que bastará para las necesidades de esos años, en que se trataba únicamente de beneficiar arenas auríferas o yacimientos argentíferos muy superficiales con abundancia de plata nativa o de compuestos de altas leyes y muy sencillo tratamiento metalúrgico.

La primera colonización, la de las Antillas, se convertirá en una febril búsqueda de oro, primero en La Española, que pronto se agota, y más tarde en Cuba, donde los rescates fueron algo más duraderos, si bien hacia 1510-1515 daban ya síntomas de agotamiento. Estos primeros rescates de oro se hacían utilizando los conocimientos de los indígenas, tanto en el hallazgo de zonas ricas en pepitas auríferas como en el posterior lavado de arenas para conseguir pedazos de oro puro, si bien introduciendo algunas herramientas europeas, las de hierro, allí desconocidas. Fueron los indígenas los que asumieron la labor de la extracción aurífera, lo que supuso un dramático descenso poblacional.

Igual sistema sigue utilizándose respecto al oro cuando se produce el salto al continente. Es entonces cuando se puede hablar de verdaderas prácticas mineras. En un primer momento se repetirá la experiencia antillana, pero pronto se procederá a la apertura de las primeras explotaciones en torno a la capital azteca. Entre 1525 y 1530 comienza a extraerse plata en Taxco, Sultepec o Zumpango. A estos trabajos se unirán los descubrimientos del norte de México, que pondrán en pie las más importantes minas del virreinato de Nueva España: Zacatecas, Santa Bárbara, Guanajuato, Real del Monte, Pachuca, San Luis Potosí, Sombrerete y Temascaltepec. La aparición de estos yacimientos hará que en los años 50 la importancia del oro sea superada por la plata, produciéndose un giro en el centro de interés de los coloni-



13.3. Corte de un pozo de la mina de Almadenejos. Bombas aspirantes de desagüe, escaleras para la bajada de mineros y torno. (Pensionados Agustín Ugena y Juan Roig, 1800.)

zadores, con la consecuencia de que la producción argentífera se convierta en el capítulo principal de la producción y el núcleo del sistema económico colonial hasta el fin de la dominación española.

Este proceso culminará cuando comience la explotación en la parte sur del continente, en lo que luego será el virreinato del Perú. Allí, al igual que en Nueva España, los españoles se interesan al principio esencialmente por la búsqueda de oro; ya desde 1542 se explotan los yacimientos de Carabaya, que inmediatamente adquieren una gran envergadura, con construcciones hidráulicas y acequias de hasta 6 km de longitud, junto con otras en el área de la actual Bolivia. Pero pronto comienza la extracción de plata, que será, aún más que en México, el signo distintivo del virreinato. Porco, una mina trabajada por los incas, será la primera explotación importante ocupada por españoles en 1538, a la que se unirán otras, como Huantajaya, algunos yacimientos menores en Arequipa y Charcas y, sobre todo, la mina mítica de América, Potosí, comenzada a trabajar en 1545.

Son los años 1492-1550 una época caracterizada por la búsqueda de yacimientos y por explotaciones sumarias. Se lava oro en los ríos o se trabajan yacimientos superficiales, que ofrecen pocas complicaciones, tanto a la hora de la extracción —se actúa sobre vetas de escasa hondura— como a la de la metalurgia, ya que en la superficie se encuentran los compuestos de más fácil tratamiento. Al igual que en la metrópoli, cuando comienzan a aparecer complicaciones se abandonan los trabajos de una veta y se transfieren a la vecina, con lo que no hay estímulos a la innovación técnica. Los primeros años de colonización no supusieron un periodo brillante en la producción minera y la mayor parte de los resultados obedeció a la continua incorporación de nuevas explotaciones.

La técnicas utilizadas son sencillas, en buena parte aprovechadas de los conocimientos indígenas, en mayor grado en el área peruana que en la mexicana. Las herramientas españolas, de hierro, sustituyen a las indígenas, pero el trabajo minero fue de una enorme simpleza en los primeros tiempos. La excavación se redujo a seguir una veta desde su afloramiento con pequeños socavones y simples tiros inclinados y, a medida que se iba penetrando, a abrir grandes cuevas para acceder más fácilmente a la capa metalífera. En tales labores, semejantes a las que por entonces se practicaban en España, no se diseñaba plan previo ni se efectuaban previsiones de cara a una mayor seguridad, un más cómodo transporte o un más fácil desagüe. Muchas minas fueron trabajadas como simples tajos a cielo abierto, cual fue el caso de Taxco en Nueva España o de los primeros momentos de la explotación de Huanacavelica. Pronto los españoles comienzan a introducir novedades también en los sistemas de extracción, ayudados por la presencia de alemanes en ultramar. La renovación de la minería comenzó, pues, antes en América que en la metrópoli. La práctica de galerías horizontales de acceso puede constatarse en Tehuilotepic, cerca de Taxco, seguramente antes de 1550. En el desagüe, la tradición peninsular no parece haberse aplicado, posiblemente porque la inundación no resultaba un problema

acuciante. Cortés introdujo bombas de desagüe «semejantes a las de los barcos», que respondían a esquemas muy primitivos: cadenas, troncos de árboles ahuecados como conducto, pistones y válvulas de paso; seguramente no eran de una gran eficacia desaguadora y solo era posible aplicarlas a pequeñas profundidades.

En el proceso metalúrgico posterior, el menor desarrollo indígena novohispano marca la diferencia respecto al caso peruano. En Nueva España se introduce el mismo procedimiento de fundición vigente en la metrópoli. Los minerales se trituraban en molinos muy elementales, a los que pronto se comienza a aplicar la energía hidráulica o de caballerías. Los hornos de fundición y afinación se construyeron como los españoles, según el modelo de los denominados «castellanos», y con ellos llega al Nuevo Mundo un instrumento desconocido, los fuelles. El plomo que se utilizaba como fundente para extraer la plata procedía de explotaciones indígenas que vendían el metal a los españoles, una forma más de integración de lo hispano y lo indígena. Pero, en general, la minería mexicana de plata fue desde el principio controlada por españoles con utilización de mano de obra indígena.

En Perú, la minería bajo dominio incaico había alcanzado niveles técnicos mayores. Porco había sido explotada de forma intensiva para el Inca, y de otras muchas minas se supone que fueron igualmente conocidas, entre ellas las de Potosí y Huancavelica, lo que sirvió de pista para su explotación por los europeos. Fueron, por consiguiente, las explotaciones incaicas la mejor guía de prospección y la más importante cantera de técnicas y mano de obra para las explotaciones españolas.

En los primeros años de explotación argentífera en Perú, los españoles dejaron el trabajo a los indígenas, limitándose ellos a cobrar un porcentaje de la producción en calidad de dueños, lo que, unido a la pequeñez de las explotaciones, que no favorecía la inversión en técnicas caras, aseguró la continuidad de los sistemas de trabajo; ello hacía posible la perforación de túneles subterráneos, la extracción de minerales, su transporte interior y exterior en sacos de cuero o capazos de caña, la molienda con molinos de trituración de piedra en forma de media luna movidos por dos hombres, la concentración por lavado en canales construidos en los cursos de agua y, por fin, la fundición en los hornos «guayras» y la afinación en un horno más pequeño, en el que el aire necesario para la combustión se insuflaba soplando los indígenas a través de tubos de cobre o caña.

Poco a poco, estas técnicas se ven mejoradas con procedimientos llegados de Europa, conservándose sin embargo la técnica indígena hasta la introducción de la amalgama, ya en los 70. Así, al igual que en el virreinato septentrional, las herramientas indígenas son sustituidas por las de hierro, mientras que en las minas de Porco se introducen los hornos castellanos, en los que el aire para la combustión se aplica por medio de fuelles. En Potosí, los canutos aplicados a los hornos de afinación se sustituyen por fuelles, más eficaces; pero el intento de introducir los hornos españoles fue un completo fracaso, por lo que la guayra continuó siendo el elemento central en el proceso de fusión del mineral durante muchos años más.

II.3. *La minería en Europa central, 1500-1550: un primer momento de esplendor*

A la Europa situada en torno al arco alpino la romanización o no había llegado o había sido muy débil. Ello hacía que, a diferencia de la Península Ibérica, los yacimientos estuvieran, avanzada la Edad Media, vírgenes y fueran de mucho más fácil explotación. Hacia el año 1000, y como consecuencia de la incipiente reactivación económica, comenzaban a trabajarse las que serían las minas metálicas más importantes de Europa hasta el siglo xx: Goslar (Harz), Freiberg (Sajonia), Schemnitz (hoy Banská Stiavnica, Eslovaquia) y otras muchas en Eslovaquia, Harz, Sajonia, Alpes, Jura, Alsacia y los Vosgos. La extracción principal era plata y como subproducto se beneficiaban plomo y cobre⁹.

En un principio la extracción era muy sencilla y superficial. Pero al llegar el despegue económico del siglo xv, se dispara la demanda de metales y de medios de pago (sobre todo cuando el comercio con Oriente comienza a drenar cantidades importantes de plata y oro y produce una balanza de pagos deficitaria para Europa). Ello supone una presión sobre las minas, que se ven obligadas a encontrar recursos más allá de las capas freáticas, compatibilizando la extracción con la presencia de agua e incrementando la producción mediante de técnicas basadas en la fuerza animal y en la energía hidráulica, fácilmente accesible en aquellas zonas. Se aplicaron además innovaciones en los procedimientos metalúrgicos, que permitieron trabajar menas metálicas con contenidos mucho más bajos. El ápice de la minería centroeuropea, basado en la extracción de plata, cobre y plomo, se produjo entre 1450 y 1560. A partir de esta última fecha, la competencia de la plata americana, los problemas de precios que acarreo y la progresiva desestabilización del área por las guerras y las luchas religiosas, el epicentro de la innovación se desplaza a Suecia y sobre todo a Inglaterra, que será el eje de la modernización minera en el siglo xviii.

Las modernizaciones de la temprana Edad Moderna consistieron, desde el punto de vista técnico —hubo otras, por ejemplo en la organización empresarial—, en máquinas que permitían desaguar las minas a grandes profundidades, así como elevar el mineral desde honduras considerables. Se trataba de grandes ruedas hidráulicas que elevaban de forma continua recipientes de cuero que se cargaban

⁹ Sobre la minería europea de la época del Renacimiento, vid. Julio SÁNCHEZ GÓMEZ: *Minería y Metalurgia en la Edad Moderna*, en *Historia de la Ciencia y de la Técnica Akal*, Madrid, 1979; Georg AGRICOLA: *De Re Metallica libri XII*, traducción española en Madrid, 1972; Vanoccio BIRINGUCCIO: *De Pyrotechnia*, ed. inglesa de Cyril Stanley Smith, Cambridge, Mass., 1958; Carlo M. CIPOLLA: *Historia Económica de la Europa Preindustrial*, Madrid, 1976; Carlo M. CIPOLLA: *Historia Económica de Europa (siglos XVI y XVII)*, Barcelona, 1979, Maurice DAUMAS, ed.: *Histoire Générale des Techniques*, París, 1965; Bertrand GILLE, *Histoire de la Metallurgie*, París, 1966; C. E. GREGORY: *A concise History of Mining*, Nueva York, 1980; Ch. SINGER, E. J. HOLMYARD y otros: *A History of Technology*, Oxford, 1957. Más ilustrativa que cualquier bibliografía puede ser la visita al Museo de la Minería alemana (Deutsche Bergbaumuseum) en Bochum.

de agua, o bien se aplicaban bombas de pistón que aspiraban el agua desde depósitos subterráneos y que eran capaces, mediante la instalación de cadenas sucesivas de bombas, de elevar el agua desde 400 m de profundidad; el progreso ha sido considerable desde los 10 m que eran capaces de remontar las máquinas de fines del siglo XIII. Estas nuevas máquinas utilizan principios técnicos resucitados de la Antigüedad junto con otros nuevos, y se logra la transformación del movimiento circular en uno de vaivén, lo que abre posibilidades en la construcción de nuevos ingenios, como los que accionan fuelles para los hornos, con los que se logra un soplido continuo que eleva sensiblemente la temperatura y se abre la puerta a una fundición más afinada de algunos minerales, o en la trituración del mineral a bocamina, que consiguen un polvo muy fino y posibilitan fundiciones más fáciles y apuradas.

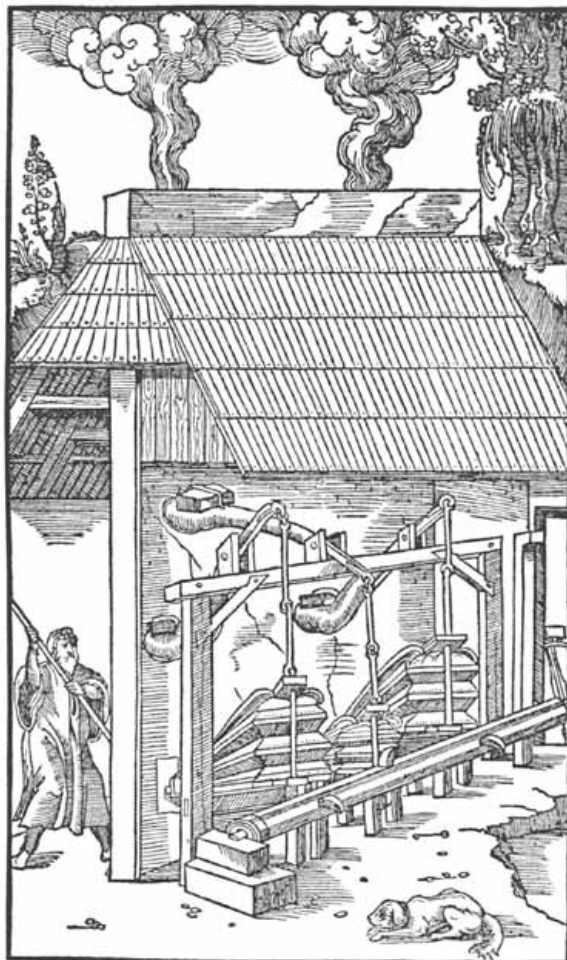
El uso de tirantes permite transmitir el movimiento a distancia, una carencia de la energía hidráulica hasta entonces. La mecanización de las minas de Europa central supera a fines del siglo XV por primera vez la técnica de la Antigüedad y es de tal magnitud que algunos historiadores han denominado al periodo «de mecanización minera avanzada».

Con estos medios se alcanzan profundidades de más de 400 m en Schneeberg (Sajonia) y mayores aún en Kitzbühel; a tales profundidades se hacía imprescindible la construcción de galerías de drenaje y evacuación del mineral. Estas galerías alcanzaron desarrollos subterráneos que llegaron a varios kilómetros en el Erzgebirge o el Harz. La necesidad de precisión en el planteamiento de tales túneles se consigue con avances en las técnicas de medida y planeamiento: mapas, planos detallados y de gran aproximación aparecen ya en Freiberg y en Kutna Hora en el siglo XVI, si bien el avance definitivo en la precisión de la planimetría, la escala, se introduce en los planos mineros en el XVII. Las enormes longitudes de estas galerías hacen necesario buscar nuevos sistemas de transporte interior: se desarrollan entonces sistemas de vagonetas con carriles de madera que facilitan el rodaje, sistema que, perfeccionado en el siglo XVIII por los mineros británicos, será el antecedente de los ferrocarriles.

También se desarrollan sistemas para la ventilación de las galerías —con ventiladores movidos por fuerza hidráulica o eólica—, imprescindibles a esas profundidades; en terrenos no rocosos, el entibado ve también notables mejoras. El trabajo subterráneo se racionaliza y se practican nuevas distribuciones internas de las cuadrillas que permiten el trabajo de numerosos operarios simultáneamente.

El talón de Aquiles de la minería renacentista fueron los procedimientos para abatir la roca. Los instrumentos —picos, azadones, martillos, cuñas, etc.— cambiaron muy poco y la auténtica transformación llegará cuando en 1627 se aplique la pólvora en la mina de Banská Stiavnica. Con medios tan rudimentarios, el ritmo de excavación de las galerías era enormemente lento.

En metalurgia los avances fueron menores. Se perfeccionan los procedimientos de tratamiento del mineral: máquinas hidráulicas para triturar el mineral antes de



13.4. Sistema con contrapesos para mover los fuelles en una ferrería. *G. Agricola, De Re Metallica.*

la fundición y para concentrarlo mediante lavado, mientras que los hornos de fundición de cobre y plomo, principales menas de oro y plata, no variaron sustancialmente, dado que el punto de fusión de ambos metales es relativamente bajo; además de los de tipo simple, se utilizaban los llamados «de reverbero», en los que el calor se desliza a lo largo de una doble pared y se refleja en la bóveda, con lo que no hay contacto directo entre combustible y mineral, lo que produce problemas en la fundición por exceso de carbono. Una de las innovaciones más rentables fue el procedimiento de fusión del cobre argentífero para obtener plata, introducido en Sajonia a mediados del siglo xv y que permitió incrementar la producción de cobre y plata, y poner en explotación muchas minas hasta entonces no rentables. Entre 1450 y 1550 aparecen en Alemania plantas para el tratamiento del cobre, mayores y más eficaces, denominadas «Saigerhutte». Por último, no fueron desdeñables los avances en el descubrimiento de sustancias para facilitar la fusión de minerales.

Sí aparecen novedades en la metalurgia del hierro. El punto de fusión de este es mucho más alto, exige unas temperaturas que no es posible lograr con los hornos al uso. Antes del siglo xv, el producto final era una masa esponjosa y recubierta de escorias que era necesario martillar largo tiempo para eliminarlas y darle la dureza y consistencia necesaria para el trabajo posterior.

El martilleo se facilitó enormemente con la aparición de los aparatos hidráulicos, conocidos en el Pirineo catalán a fines del siglo xii y que los cistercienses difundieron por Europa en el xiii. Este instrumento se transfirió después a la metalurgia del cobre.

Pero el reto principal era fundir el mineral para obtener hierro colado. Las tentativas para conseguirlo eran antiguas; en Moravia se habían utilizado en los siglos viii y ix hornos excavados en tierra en los que se alcanzaron los 1.400°, con lo que se conseguía parcialmente hierro con propiedades de acero. En los siglos siguientes, los perfeccionamientos en los instrumentos de soplado de aire y en los materiales de las paredes van permitiendo acceder a hornos de mayor tamaño y emergidos de la tierra. La culminación del proceso llega en el siglo xv con la aparición del procedimiento indirecto para la obtención de hierro colado, el alto horno, técnica que permanecerá prácticamente estable hasta la introducción de las innovaciones británicas de la segunda mitad del siglo xviii.

Las mayores dimensiones de los hornos permitieron cargas de combustible mucho más considerables y la aplicación de la energía hidráulica a los fuelles abrió la puerta de una oxigenación interior mucho más potente, con lo que se incrementa notablemente la temperatura interior. Como consecuencia, el mineral de hierro en un determinado momento apareció líquido. Se había descubierto el hierro colado. La fecha del primer uso de este producto, diferente del hierro forjado, puede situarse en los primeros años del siglo xv; en cuanto al lugar, tradicionalmente se ha creído, y no hay datos que lo contradigan, que apareció en la región de Lieja, de donde se expandió a Lorena. La emigración de obreros difundió el alto horno en una lenta progresión que en el siglo xvii lo había llevado por la Europa del norte, mientras que la del sur continuó aferrada a los viejos procedimientos, como la forja catalana, que aunque eran menos eficaces consumían mucha menos madera, un bien escaso en el entorno del Mediterráneo.

El hierro fundido debía someterse a diversas transformaciones para ser utilizable. La primera consistía en separar el carbono excedente mediante calentamiento de la fundición en presencia de un material capaz de absorber dicho carbono, generalmente escorias de fundiciones anteriores. El descubrimiento de este proceso fue posterior al del alto horno y surgieron pronto diversas variantes —procedimiento valón, *champenoise*, *nivernaise*, *comtoise*, alemán, borgoñón, etc.— aplicables a los diversos tipos de mineral de hierro. Tras la afinación, el lingote de hierro era aún una estructura irregular y esponjosa y era preciso golpearla con martillos hidráulicos para obtener el producto final.

El tratamiento posterior de los lingotes fue objeto también de mecanización ya en el siglo xvi. Surgen máquinas hidráulicas de laminado, consistentes en dos cilindros juntos que se movían en sentido inverso y que aparecen citadas en Liège en 1561; máquinas para cortar el hierro en barras, a base de dos cilindros provistos de cuchillas, con lo que aquel quedaba preparado para fabricar clavos, cañones de fusil, etc; máquinas para producir hilo de hierro, en las que el hilo pasaba por una serie de agujeros cada vez más pequeños y se enrollaba en una bobina accionada por una rueda de molino, existentes ya a mediados del siglo xvi.

En resumen, los años 1450-1550 ven una actividad desbordante en la introducción de novedades que incrementan la producción de metales y reducen sus costos. Sin embargo, aquel desarrollo se enfrentaba a limitaciones económicas, sociológicas y técnicas que le hicieron tocar techo a mediados del siglo xvi y, además, ceñirse a unas áreas geográficas y a unos metales muy concretos. Se produce en primer lugar un problema de rentabilidad dado el coste de la maquinaria y la insuficiencia de técnicos capaces de manejarla.

A mediados de siglo, por ejemplo, los empresarios de las minas de estaño de Bohemia decidieron mecanizar sus explotaciones, pero el plan hubo de ser pronto abandonado; lo que era rentable en las minas de plata no lo era en las de estaño, como tampoco en las de plomo o hierro: el precio final de estos metales no justificaba inversiones tan cuantiosas. Además, era preciso considerar el coste de los métodos primitivos a los que las nuevas técnicas venían a sustituir; la minería inglesa del estaño empleaba aún en el siglo xvii muy pocas bombas de desagüe y la razón estribaba seguramente en el menor coste de la apertura de nuevas galerías poco profundas, que descansaba en la fuerza de trabajo humana. Por último, la sustitución de trabajo humano por tecnología era aún poco rentable, dada la existencia de una reserva de mano de obra rural a la que los empresarios podían recurrir a bajo precio, sobre todo en una centuria de expansión demográfica.

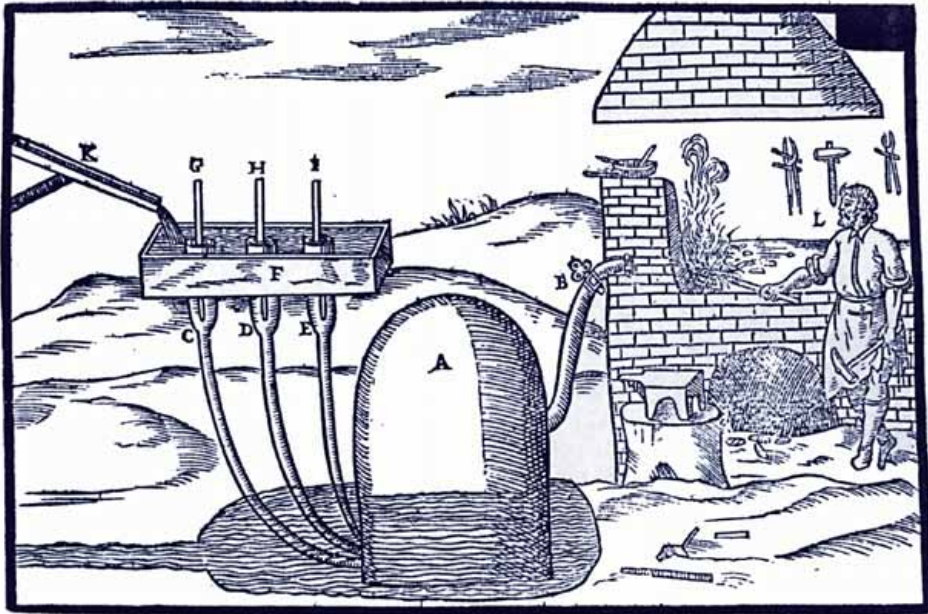
El trabajo era abundante y barato, lo que frenaba la aplicación de técnicas *labour-saving*, un elemento que veremos pesar en el desarrollo de la minería en la América colonial.

En segundo lugar, existe toda una serie de resistencias de tipo sociológico: las de todo colectivo a aceptar cambios en las soluciones conocidas y la oposición de los trabajadores desplazados por la maquinaria y que no podía compensarse con otras oportunidades de trabajo; cuando esta oposición se generalizaba, los poderes públicos acababan prohibiendo la introducción de determinada innovación, convirtiéndose así en un factor de retraso en la adopción de nuevas técnicas.

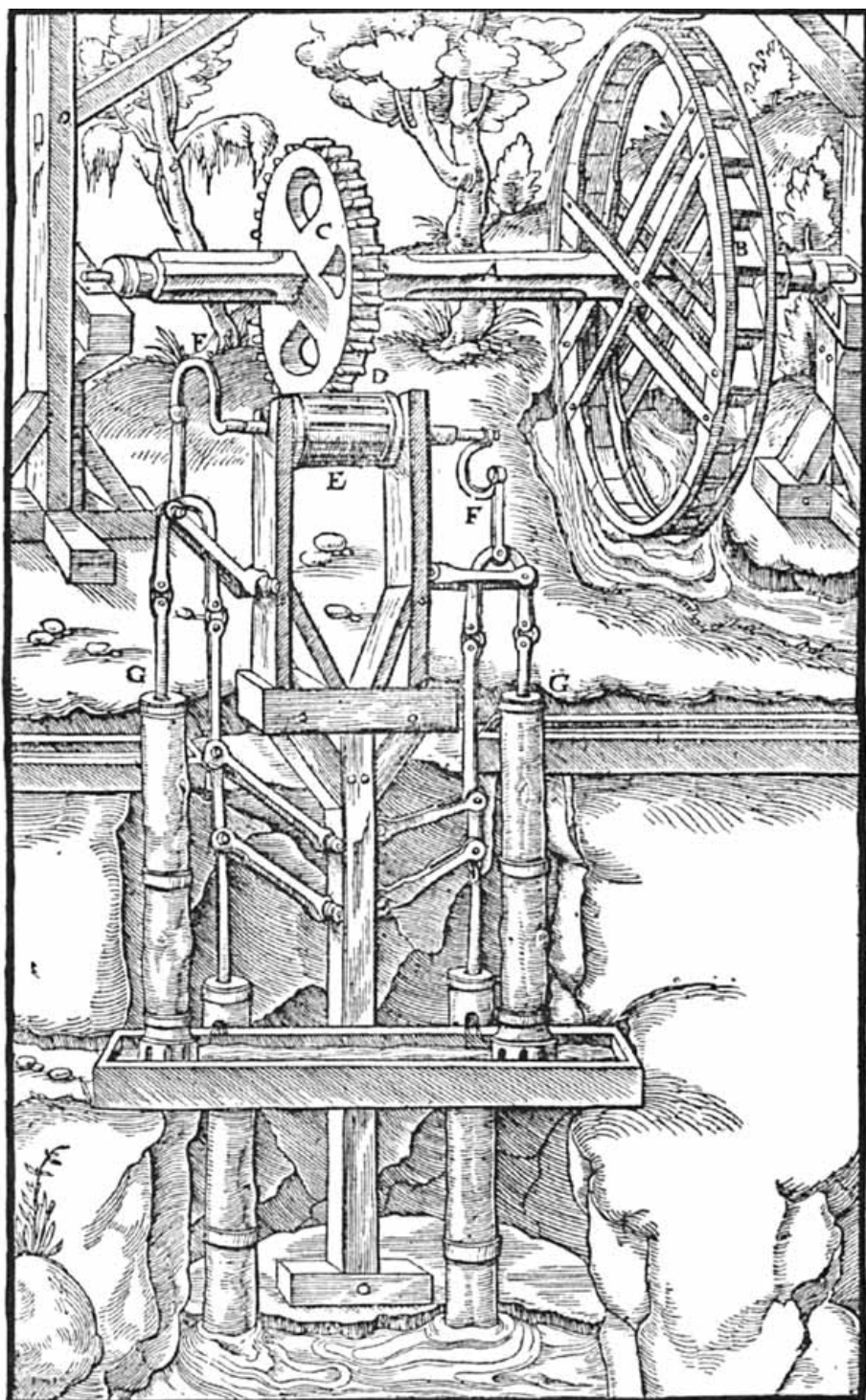
Por último, la sustitución de energía humana por instrumentos técnicos tenía un techo fijado por las fuentes de energía conocidas: la de los animales de tiro, de la madera y la hidráulica. Esta última fue la gran revolución de los siglos xiii-xvi, de la misma forma que el vapor fue la del siglo xix. Sin embargo, todas ellas son soluciones insatisfactorias: la fuerza del agua no siempre puede ser llevada al punto desea-

do; la madera es un bien escaso y de muy difícil transporte, y la tracción animal produce una energía de muy baja potencia. Todo ello supone un importante *handicap* a la hora de aplicar masivamente el uso de máquinas, algo que solo será posible con el descubrimiento de la aplicación del vapor.

Es preciso no perder la perspectiva de lo que estos cambios suponen. Solo un área muy concreta —la Europa Central y, en menor medida, el oeste de Polonia— y un número reducido de minas —casi siempre con contenidos en oro o plata, las únicas que soportaban inversiones importantes de capital—, que algunos especialistas calculan en un 10%, reciben el impacto de la nueva técnica antes de 1550. Hasta esa fecha, la minería moderna se reduce al ámbito del Imperio germánico y a los minerales cuyos beneficios son mayores. En la segunda mitad del siglo y en el siguiente van extendiéndose al resto de Europa y a otros productos —caso del alumbre y el vitriolo en los Países Bajos y las Islas Británicas o, más tarde, del carbón mineral—, pero pervivirán amplias bolsas de producción no afectadas por los cambios, donde lo normal es la explotación individual en la que trabajan pequeños empresarios que forman compañía, con la participación esporádica de jornaleros contratados a destajo, sin posibilidad de inversión en técnica. Hasta 1550 la empresa grande es la excepción. Después de esa fecha, y hasta el siglo XIX, seguirá siendo minoritaria en el conjunto europeo.



13.5. *Trompa de soplado en una ferrería.* G. Branca, *La Machinae*, 1629



13.6. *Bombas de pistones movidas por una rueda «gravitatoria», según De Re Metallica, de G. Agricola.*

La difusión de las innovaciones fuera de Europa se producirá en la segunda mitad del *xvi*, mediante la emigración de mineros y la aparición de la bibliografía técnica, en ausencia, antes del *xviii*, de escuelas especializadas. El primer fenómeno tenía raíces antiguas. Ya en los siglos *xii* y *xiii* mineros germanos habían emigrado hacia el Este. A mediados del *xvi*, una serie de causas hacen que grupos de mineros del área del Imperio se dispersen por zonas cada vez más alejadas: alza demográfica, conflictos constantes políticos y religiosos en Europa central, crisis que azota allí a la minería y se traduce en cierre de explotaciones y descenso de salarios, y privilegios que se les ofrecen en otras zonas en forma de remuneraciones más elevadas, o privilegios por parte de los poderes públicos deseosos de atraerlos.

El segundo canal de difusión de las nuevas técnicas será la bibliografía especializada, un fenómeno nuevo ligado a la aparición de la imprenta. Son libros dirigidos a la descripción y difusión de prácticas y, por tanto, a gentes sin formación científica y que carecen del más mínimo aparato erudito.

Las primeras obras conocidas son pequeños manuales anónimos, destinados a enseñar a los mineros las prácticas elementales (cómo encontrar venas y trabajarlas) y que contienen indicaciones sobre el origen de los metales subterráneos. Son los denominados *Bergbüchlein* y *Probierbüchlein*, que alcanzaron una gran difusión para los parámetros de la época. Pero la cumbre de la bibliografía minerometalúrgica del momento serán tres obras publicadas en el *xvi*. En primer lugar, la del italiano Vanoccio Biringuccio, *De Pyrotechnia libri x*, publicada en 1540, es la primera explicación sistemática de las técnicas metalúrgicas en uso, que incluye descripciones de máquinas movidas por energía hidráulica y que además ofrece la primera referencia escrita de la posibilidad de extraer plata a base de la utilización de mercurio.

La obra de Biringuccio pronto queda superada por la que será la cumbre de la literatura minerometalúrgica anterior al Siglo de las Luces, el tratado del médico sajón Georg Agricola, *De Re Metallica libri xii*, suma de los conocimientos metalúrgicos de la época y de la región técnicamente más adelantada del mundo en la materia, aparecida en Basilea en 1556, que incluye casi 300 ilustraciones de una enorme claridad descriptiva, que caracteriza también al texto. El éxito de esta obra fue muy prolongado; si bien su edición original estaba redactada en latín, la primera traducción alemana apareció ya en 1557 y su difusión fue tal que se cita profusamente en América, donde puede encontrarse en varias bibliotecas del siglo *xviii*, a la par que fue conocido y utilizado en un lugar tan alejado, cultural y geográficamente, como China.

El tercer gran pilar de la bibliografía técnica de la época fue Lazarus Ercker, que también trabajó en los Montes Metálicos y que, fruto de su experiencia, publicó un tratado minerometalúrgico en 1574 que complementa la obra de Agricola, sobre todo en relación con el ensayo de minerales.

Sin embargo, estos tratados apenas recogen aspectos relacionados con la metalurgia del hierro. El primero que se ocupa de ella es de un español, el médico sevillano Nicolás Monardes, quien en su obra *Diálogo del Hierro* (1574) rompe con la

hipervaloración que se concedía a las explotaciones de oro y plata. Destacan sus descripciones de los procedimientos usados en las ferrerías. Pero habrá que esperar al siglo XVIII para que aparezcan las grandes obras dedicadas a la siderurgia.

Biringuccio, Agricola y Ercker dominan la ciencia minerometalúrgica hasta el siglo XVIII, con la única excepción, para el siglo XVII, de la obra del andaluz Álvaro Alonso Barba, hombre de formación americana y cuya importancia capital denota un cierto desplazamiento de la técnica centroeuropea por la del Nuevo Mundo en la citada centuria, al menos en lo que se refiere a la metalurgia de la plata.

¿Qué capacidad difusora de técnicas tenía en realidad la bibliografía especializada? Es difícil saberlo. El que un empresario minero poseyera una de las obras citadas no implica que fuera capaz de reproducir máquinas o procedimientos. Obras escritas en latín, pero, sobre todo, la carencia, por ejemplo, de escala en las ilustraciones hace difícil pensar que pudieran ser construidas siguiendo las indicaciones de los libros. Es seguro que en el siglo XVI la transmisión a través del movimiento de los que poseían conocimientos siguió siendo la casi única forma de difusión de estos.

III

LA RENOVACIÓN DE LA MINERÍA ESPAÑOLA

Todo este bagaje de novedades técnicas era, como hemos visto, absolutamente desconocido en España y sus territorios americanos, que seguían practicando una labor minerometalúrgica sumamente primitiva. Pero una serie de factores va a coincidir de forma rápida para producir en la década de los 50 una transformación radical en el panorama minero peninsular. El primero de ellos será la introducción de los Fugger, alemanes, los más importantes banqueros del momento y también grandes empresarios mineros en la Europa central. Con importantes relaciones financieras con el emperador Carlos V, consiguen la concesión real de un amplio territorio para la explotación de su subsuelo, ubicado entre Madrid y la vertiente norte de Sierra Morena. En ella, los Fugger trajeron a trabajar a más de doscientos oficiales y mineros alemanes y comenzaron a efectuar inversiones en diversas máquinas, dotando a las explotaciones que ponen en marcha en el área de Alcuña-Almodóvar de la más avanzada técnica entonces disponible¹⁰.

El segundo factor de renovación fue la introducción revolucionaria de un nuevo procedimiento para la metalurgia de la plata en América, basado en el uso de mercurio —el procedimiento del patio—, en 1554. La rápida aceptación del nuevo

¹⁰ En relación con esta década de renovación de la minería española, vid. Julio SÁNCHEZ GÓMEZ: *De Minería, Metalurgia y comercio de metales*, Salamanca, 1989; Julio SÁNCHEZ GÓMEZ y OTROS: *La savia del Imperio*, Salamanca, 1998; Antonio MATILLA TASCÓN: *Historia de las minas de Almadén*, Madrid, 1958-88.

método y la inexistencia de una producción de azogue en ultramar hasta el descubrimiento de Huancavelica en 1563 desplazaron toda la demanda americana sobre Almadén, que pasa de acumular *stocks* por inexistencia de un mercado para su producción a verse sometida a una fuerte presión de demanda. La Corona, interesada tanto en el fomento de la producción argentífera ultramarina como en la extracción y exportación de mercurio por motivos fiscales, inicia una renovación de la explotación que pronto entrega a los Fugger. Estos, auxiliados también aquí por germanos, introducen diversas innovaciones técnicas, como bombas de desagüe de concepción más moderna o la sustitución de los hornos de xabecas por los de reverbero, primeros instalados en España. Nuevas técnicas y facilidades de mano de obra concedidas por la Corona, en forma de galeotes y moriscos forzados, permitieron elevar la producción desde 600 quintales anuales en 1563 a 2.100 en 1572.

El tercer y último factor de renovación de la minería castellana fue la aparición y puesta en producción en 1555 de la mina de plata de Guadalcanal, en el norte de la actual provincia de Sevilla. La altísima riqueza inicial de la explotación llevó a la Administración Real a tomar una decisión sin precedentes: la incautación a sus propietarios y la puesta en pie desde cero de una explotación directa por administración de la Real Hacienda.

Para iniciar la explotación de Guadalcanal, la Corona ordenó el traslado de todos los técnicos que los Fugger tenían contratados en sus cercanas minas de Almodóvar-Alcudía, y con su concurso y el de expertos llamados por la Real Hacienda desde diversos territorios europeos —el Imperio, Venecia, Flandes— y desde Nueva España, Guadalcanal se convierte durante el efímero tiempo de su máxima producción —1555 a 1570— en un crisol de experiencias españolas, centroeuropeas y americanas que hacen del yacimiento andaluz un centro muy vivo de aplicación y experimentación de nuevas técnicas. Fundamentalmente se entrecruzan en Guadalcanal las dos experiencias mineras más importantes del momento, la centroeuropea y la americana, un caso único en su siglo en el Viejo Continente.

En el momento de máxima presencia de extranjeros, llegan a trabajar en la mina andaluza más de doscientos mineros centroeuropeos. A través de ellos se introducen técnicas habituales en el ámbito germánico pero aquí desconocidas, y que renuevan todas las fases del trabajo minero y metalúrgico. Nuevos sistemas de entibación con madera que permiten la apertura de pozos y galerías más amplios y, por tanto, susceptibles de acoger mayor cantidad de trabajadores, lo que aumenta la capacidad de extracción. En el derribo de mineral, instrumentos más eficaces y auxilio del fuego para facilitar la apertura de grietas. En el desagüe, se construye la mayor galería hasta entonces abierta en el ámbito hispánico —cerca de 100 m de recorrido— y se instala la primera máquina de elevación de tipo malacate, un enorme ingenio movido por doce mulas con ruedas engranadas para transmitir el movimiento. El transporte interior conoce los primeros carretones de madera arrastrados por caballerías o trabajadores, el más directo antecedente de las vagonetas. La organización

interna del trabajo se transforma por aportación de los alemanes, lo que permite cuadrillas de cinco trabajadores que atendían simultáneamente derribo, desagüe y extracción de mineral. Hay que decir también que —aparte de la presencia de esclavos negros— Guadalcanal tuvo la más importante concentración de trabajadores que percibían un salario monetario en la España de su tiempo.

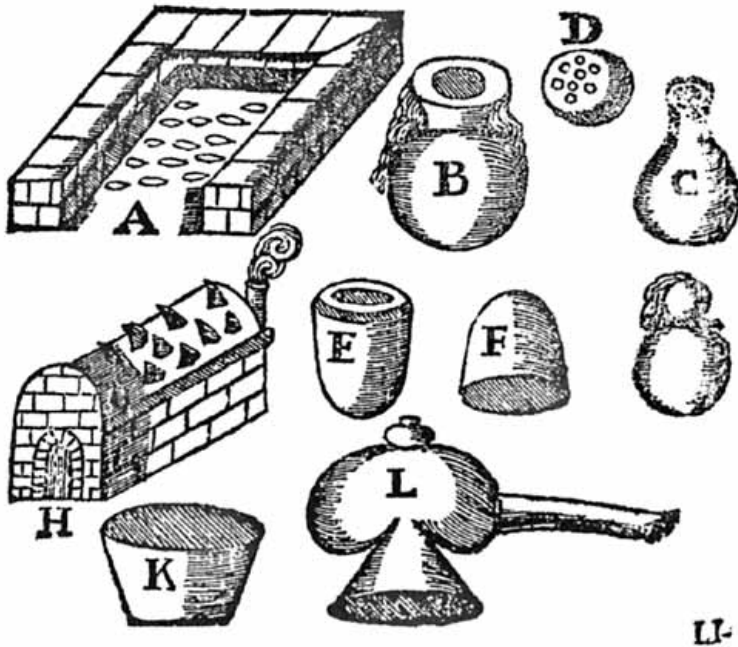
También para el tratamiento de mineral se introducen en Guadalcanal importantes innovaciones en la concentración y trituración, dos procesos mecanizados con ingenios movidos por caballerías, adaptación a un entorno seco de los mecanismos hidráulicos utilizados en Europa central. Por último, en el proceso de fundición, los tradicionales hornos «castellanos» son dotados de ingenios para mover los fuelles con mulas, lo que incrementa notablemente su rendimiento, y se introducen al mismo tiempo que en Almadén los mucho más eficaces hornos de reverbero.

Pero también del otro lado del Atlántico llegan innovaciones que han ido apareciendo en la dinámica minería novohispana: modificaciones en los hornos castellanos y en el tratamiento previo del mineral antes de la fusión, pero, sobre todo, el revolucionario procedimiento del patio, que se practicará en aquella mina hasta fines de siglo como único lugar fuera de América donde se utiliza antes del siglo XVIII.

Guadalcanal se convertirá en el principal centro de irradiación de las nuevas técnicas centroeuropeas hacia América, adonde emigrarán sus expertos cuando en 1570 comience la decadencia, y de las americanas hacia otras minas españolas y de la Europa del norte. Será un técnico de Guadalcanal quien efectúe demostraciones del proceso del azogue ante la corte de Viena, fracasadas más por motivos de carácter político que estrictamente técnicos.

Fuera de la efímera explotación de Guadalcanal, la renovación se produce también en algunas minas del distrito de Alcudia-Almodóvar. Se explota allí un amplio conjunto de yacimientos de los que se extrae plomo argentífero. Algunos de ellos ven una capitalización de cierta importancia y una renovación técnica que cuenta con el apoyo de técnicos alemanes llegados de Guadalcanal. De la práctica de simples agujeros que se abandonan en el momento en que la profundidad acarrea inundación y derrumbamiento se pasa a una explotación con pozos y galerías y al desagüe con bombas. En la mina de San Quintín llegó a haber en la década de los 60 hasta 250 trabajadores, la mayor concentración industrial de capital privado del país. Junto a estas pocas minas capitalizadas y modernizadas, coexistían y predominaban muchas otras muy pequeñas que realizaban una explotación tradicional. Fuera de este distrito, hay trabajos de muy poca envergadura en minas dispersas por las dos vertientes de Sierra Morena, desde Fuenteovejuna a Jabugo; comienza ahora también, pero a una escala muy pequeña, la explotación de las minas de Linares.

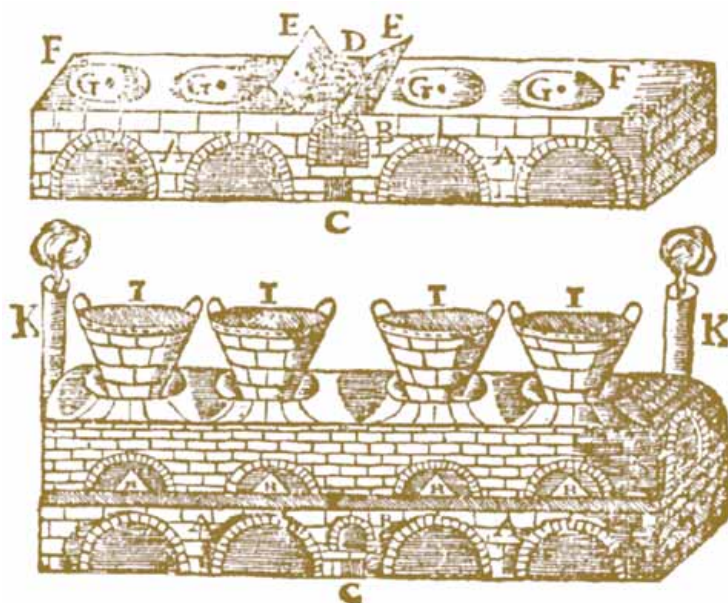
En una buena parte de estas minas era el contenido en plata del plomo lo que compensaba la explotación, sobre todo en aquellas que habían desarrollado un beneficio más mecanizado y que, por tanto, soportaban mayores gastos de explotación. La abundancia de plata que llega a España después de 1560 y la paralela subida



13.7. *Horno de xabeca (letra H)*. Álvaro Alonso Barba, *Arte de los metales*, 1640.

de precios arruinaron precisamente a las empresas más renovadas, de manera que a fines de siglo toda la renovación de la década central se había reducido a nada y solo subsistían las explotaciones más primitivas, que soportaban costes mucho menores y cuya producción en conjunto se quedaba muy por debajo de la demanda interna, por lo que el reino se veía obligado a importar continuamente plomo del exterior.

Lo mismo sucede con el cobre y el estaño, dos producciones para las que existía una demanda creciente en la segunda mitad del siglo xvi —piénsese en el armamento o en el creciente uso del cobre en la amoneda— . De cobre había importantes reservas en el suelo peninsular, sobre todo en el suroeste, en buena parte ya explotadas en la época de Roma. Y esta circunstancia fue el factor que impidió que se explotaran significativamente antes del siglo xix. Las minas habían llegado a profundidades muy considerables, estaban inundadas y era enormemente costoso plantearse volverlas a poner en estado de producir; pero además su misma profundidad había hecho que se encontraran en los estadios de minerales complejos para los que los técnicos, a pesar de repetidos intentos, fueron incapaces de encontrar el procedimiento adecuado de fundición. Hubo un factor más: el aislamiento que Felipe II decide respecto del mundo protestante rompe los lazos con el ámbito germánico e impide los intercambios técnicos que caracterizaron a la primera mitad del siglo. Ello seguramente fue la causa del desconocimiento en España del procedimiento del «Saigerhütte», que permitía el beneficio de menas complejas de cobre.



13.8. «Del modo que se han de disponer los fondos en que se han de beneficiar los metales». Álvaro Alonso Barba, *Arte de los Metales*, 1640.

Tampoco de estaño hubo producción significativa antes del siglo XVIII, a pesar de los estímulos por parte de la Corona. La consecuencia fue que, en ambos casos, España se viera obligada a importar el cien por cien de sus necesidades.

Por último, hay tres producciones extractivas que tuvieron importancia en la segunda mitad del XVI: el alumbre, sulfato de aluminio y potasio, sustancia insustituible en la industria textil (como fijador de las materias colorantes sobre las fibras textiles) y con aplicación también en el curtido de pieles, en la fabricación de vidrio y en la preparación de recetas de uso medicinal. España fue en esta época, junto con el Estado Pontificio —Tolfa— la principal productora y exportadora de este producto¹¹, obtenido en los yacimientos de Mazarrón, Cartagena, Rodalquilar y otras pequeñas explotaciones cerca de Úbeda y Vera. La extracción del alumbre se realizaba en tajos a cielo abierto, en una labor más parecida a la de una cantera que a la de una mina. La tierra extraída era refinada mediante cocción en grandes calderas.

El azufre era un ingrediente esencial en la fabricación de pólvora, producto que ya a fines del siglo XVI era el núcleo de la guerra. No existía producción en el reino antes de 1570, en que se descubre el yacimiento de Hellín, pero la falta de conoci-

¹¹ Sobre la producción de alumbre, vid. Jean DELUMEAU: *L'alun de Rome*, París, 1973; Julio SÁNCHEZ GÓMEZ: *De Minería, Metalurgia...*; Ramón CARANDE: *Carlos V y sus banqueros*, Madrid, 1948-65.

mientos técnicos impide su puesta en explotación. Solo después de 1586, con el concurso de técnicos italianos se ponen en marcha. La disposición de las vetas permitía el trabajo a cielo abierto, si bien esto en una explotación de cierta envergadura era una importante innovación y planteó retos que hubo que resolver. En los primeros tiempos —cuando se extrajeron las vetas más altas, en la centuria siguiente, hubo que recurrir a la explotación subterránea— se practicaba un agujero en forma de tronco de cono —«abrir plaza»— hasta alcanzar las vetas de mineral. Se extraía después la tierra rica en contenido de azufre rompiendo la veta con picos, almadenetas y barras de hierro, y en superficie se trabajaba con cedazos para separar la piedra rica de la estéril.

Después, se sometía el mineral al proceso de fusión para lograr azufre puro. Este revestía también una gran sencillez y guardaba ciertas semejanzas con el empleado para la fundición del cinabrio a fin de obtener mercurio. En unos hornos de pequeña altura contruidos con barro, revocados en su interior con cal y arena para aumentar la reverberación del calor, y con una puerta inferior para cargar el combustible y el mineral, se colocaba el mineral de azufre en unas ollas dotadas de un doble fondo inferior con un orificio; a la aplicación del calor, el azufre destilaba por este hacia abajo, mientras que en otros el doble fondo se ubicaba en la parte superior, con lo que el azufre refinado podía recogerse tras el enfriamiento del recipiente. Parece que el azufre de los últimos resultaba de mayor pureza, ya que en los primeros se mezclaba en parte con la escoria, por lo que pronto serán aquellos los que predominen.

Las técnicas iniciales llegadas de Italia fueron perfeccionándose para adaptarlas a las características específicas del azufre de Hellín. A comienzos de los 90, los dos hornos eran capaces de producir seis arrobas de azufre en 30 horas, mientras que a fines de siglo se había aumentado la capacidad al doble, con cuatro hornos y el tiempo reducido a 10 horas. Varias de las mejoras fueron introducidas por técnicos italianos —la principal producción europea de azufre tenía su centro en el reino de Nápoles— al servicio de la Corona.

El último de los metales que tuvieron producción significativa en la España renacentista fue el hierro. Vimos que era ya en la primera mitad del siglo la más importante —la única si exceptuamos el alumbre y la casi anecdótica, por las cantidades, del mercurio— exportación metálica de la España peninsular. La producción siguió siendo elevada, sobre todo basada en el yacimiento de Somorrostro, una reserva de mineral de hierro de características inigualables para su tratamiento en horno bajo. Pero a medida que el siglo avanzaba, el alto horno iba conquistando Europa y arrojando una producción de menor calidad que el hierro vasco pero de mucho menor precio¹².

¹² Sobre el hierro en la España de la Edad Moderna, vid. Valentín VÁZQUEZ DE PRADA: *Historia Económica y Social de España*, Madrid, 1978; Luis María BILBAO y Emiliano FERNÁNDEZ DE PINEDO: «Auge y crisis de la siderometalurgia tradicional en el País Vasco (1700-1850)», en Pedro TEDDE: *La economía española al final del Antiguo Régimen*, vol. II: *Las manufacturas*, Madrid, 1982.

Ello fue cerrando los mercados a este hierro en la Europa del norte, lo que significó una crisis en su producción, acentuada en el siglo siguiente. El hierro de forja se mantendrá porque sigue siendo insustituible para algunas aplicaciones: rejas, armas blancas y otros objetos de elaboración delicada; pero la demanda más importante, la de la artillería, la marina o la mayoría de las herramientas u objetos domésticos, se dirigía al colado, mucho más económico aunque su calidad no fuera tan alta. Quizá el factor fundamental del sostenimiento de la producción de hierro cantábrico fue la existencia de un mercado cautivo en las colonias ultramarinas, cerradas al comercio legal de hierro no vascongado.

El hierro elaborado con el procedimiento tradicional sobrevivió, con dificultades, no solo en el siglo siguiente, sino hasta los albores del siglo xx. El País Vasco no dio el salto al alto horno en todo el tiempo de vigencia del Antiguo Régimen, e incluso se opuso a la acción de técnicos que llegaron desde los Países Bajos para introducirlo. El interés de la Corona dio lugar a la primera tentativa de introducción del hierro colado en El Pedroso (Sevilla), que fracasó.

Solo avanzada la centuria siguiente se lograría poner en funcionamiento el primer alto horno con continuidad en Liérganes, cerca de Santander. También en el hierro, en el que en la primera mitad del siglo España ocupaba un lugar puntero en Europa, el último tercio de la centuria condenaba a España al retraso tecnológico por largo tiempo.

IV

EL DESPEGUE DE LA MINERÍA AMERICANA

Si hasta 1540 la producción de oro y plata en América se había nutrido de la explotación de los tesoros indígenas y de la extracción de minerales fáciles con las técnicas locales, y en la década de 1540 comienza la renovación con la llegada de los primeros técnicos alemanes, la de los 50 será la del gran salto, como consecuencia de la introducción del revolucionario sistema metalúrgico de la amalgama, pero también de otras innovaciones surgidas ya en América, que comienza a producir su propia técnica, y de la renovada minería peninsular¹³.

Ya antes de 1550 se detecta la presencia de germanos en las explotaciones americanas, exceptuados de las prohibiciones que pesaban sobre la entrada de extranjeros en Indias. En 1528, por ejemplo, Carlos I firmaba contrato con los financieros

¹³ En relación con la minería americana colonial, vid. Julio SÁNCHEZ GÓMEZ y otros: *La savia del Imperio*; M. BARGALLÓ: *La minería y la metalurgia en la América española durante la época colonial*, México DF, 1955; H. BONILLA: *El sistema colonial en la América española*, Barcelona, 1991; Mervin LANG: *El monopolio estatal del mercurio en el México colonial*, México, 1977; G. LOHMAN VILLENA: *Las minas de Huancavelica en los siglos XVI y XVII* Sevilla, 1949; Juan MARCHENA FERNÁNDEZ: *Potosí, plata para Europa*, Sevilla, 2000.

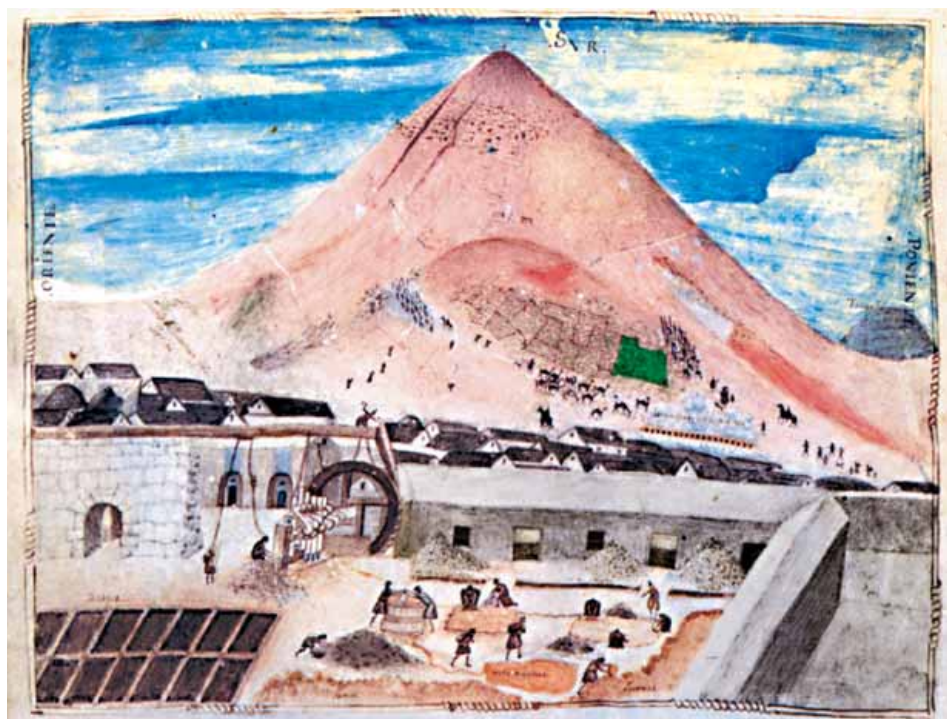
Welzer para la explotación del territorio de Venezuela; en respuesta a tal acuerdo, los banqueros llevaron a América 50 mineros procedentes de los Montes Metálicos y de Silesia que, tras el fracaso de la expedición desde el punto de vista minero, se trasladaron en parte a Nueva España y Perú.

Igualmente, un grupo de mineros posiblemente vinculados a los Fugger llegaba en la década de los 40 a México «con aparejos e industria para fundir metales en las minas de plata, que hasta entonces no se entendía, e hicieron ingenios de fundir metales», parece que en las minas de Sultepec, donde junto con Taxco está documentada la presencia de centroeuropeos antes de 1550. Luego llegarían más. Todos ellos contribuyeron a esa primera introducción de técnicas europeas que se añaden a las indígenas y a las llevadas por los españoles para dar lugar a la primera oleada de producción significativa de plata, que tiene lugar a fines de los años 40 y en los primeros 50.

Pero es precisamente en el lustro 1550-1555 cuando comienzan a advertirse alarmantes síntomas de crisis en la minería de Nueva España. Aunque en esos años se están poniendo en explotación casi de forma continua nuevas minas, las más productivas del virreinato hasta el siglo XVIII, los rendimientos decrecientes aparecen en seguida y comienzan a hacerse insoportables en algunas partes. La producción de plata inicia una decadencia no tan notable en términos globales cuanto a escala local, derivada de los altos costos del procedimiento habitual de fundición, que consumía enormes cantidades de leña para alimentar los hornos, un bien escaso en algunas áreas de México. El gasto de madera, que obviamente subía de precio de forma rápida, podía soportarse cuando se extraían minerales de alta ley, pero resultaba en pérdidas cuando la riqueza de los minerales disminuía o incluso cuando, manteniéndose una cierta ley, había que descender a profundidades considerables para extraerlos, con el correspondiente incremento de gastos de explotación. Hacia 1550-1552 la madera había desaparecido prácticamente en las zonas cercanas a las áreas mineras más antiguas, que habían quedado deforestadas.

En Perú el problema se presentó algo más tarde. En un principio el mineral de Potosí era de ley tan elevada que hizo pensar a los españoles que las minas eran inagotables y que la guayra era un procedimiento suficiente para su tratamiento, pero a mediados de los cincuenta comenzó la escasez de combustible, y hacia 1560 también el mineral más productivo, extraído ya a una profundidad considerable, descendía de riqueza. El ciclo de plata peruano parecía que se iba a abortar justamente en su nacimiento.

Fue esta grave situación en lo que ya se había convertido en el nervio económico de la colonización, la producción argentífera, la que dio impulso en la segunda mitad del siglo XVI a la búsqueda y experimentación de sistemas menos costosos de beneficio, de los que el de la amalgamación con mercurio saldrá triunfante. No es casual, vista la más temprana aparición de la crisis en México, que aquel comenzara a utilizarse en las minas de la colonia más septentrional.



13.9. «El cerro rico de Potosí». *The Hispanic Society of New York (ms. K3, h. 1584). En primer plano un «patio» de beneficio por amalgamación, donde se observa un molino de almadanetas movido por una gran rueda vitruviana.*

Tal como se aplica el procedimiento de amalgamación en sus inicios —el beneficio experimenta cambios y mejoras hasta fines del siglo XIX—, consistía en un previo molido fino del mineral con mazos o morteros, movidos por caballerías o fuerza hidráulica, completada a veces con la pulverización en molinos y amasado posterior de la masa humedecida. A continuación se mezclaba la masa con sal y mercurio, a los que años más tarde se añadió el denominado «magistral», partículas de algún metal, generalmente cobre, pero también limaduras de hierro, que servían para facilitar y acelerar el beneficio, algo imprescindible cuando, con la profundización, los minerales se hacían progresivamente complejos. Tras un largo reposo, a veces de varios meses, se producía el lavado con agua del material en tinajas provistas de molinillo agitador, movidas también a veces por animales o fuerza hidráulica, para separar la amalgama de plata y mercurio de la ganga. Por último, con ayuda de calor —de escasa entidad, por lo que no aportaba problemas de combustible—, se producía el desazogado de la pella mediante sublimación.

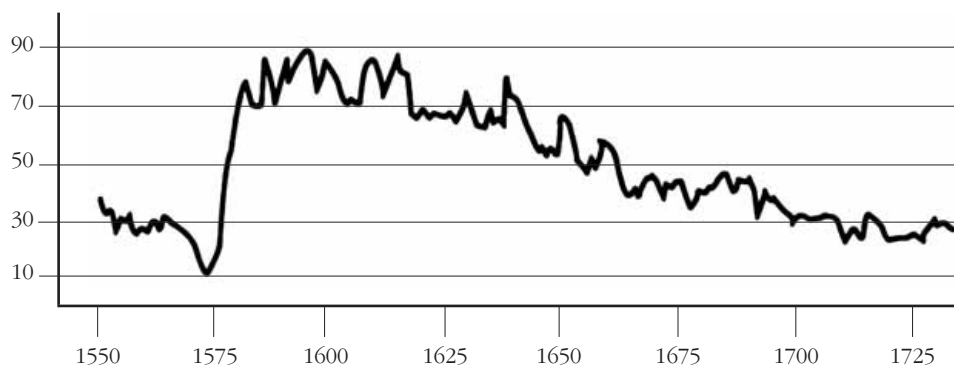
En torno a la originalidad de la amalgamación se ha producido una larga y tediosa polémica de tintes claramente nacionalistas, aunque está claro que el procedimiento, aplicado por primera vez por el sevillano Bartolomé de Medina en la mina

de Pachuca (Nueva España) en 1554, era conocido y había sido utilizado, siquiera fuera en muy pequeña escala y de forma muy local, en Europa (Véneto) antes de esa fecha. Aunque es preciso decir también que, si el procedimiento era conocido, su entrada en la historia y en el proceso económico se produce en Nueva España, donde pasa de ser una mera curiosidad a aplicarse a escala importante. Además, fue también allí donde se produjeron todos los perfeccionamientos e innovaciones que lo hicieron adaptable a minerales o circunstancias ambientales muy diferentes, hasta que a fines del siglo xviii Von Born lo reintrodujo en Europa Central.

En cualquier caso, el éxito del beneficio fue fulgurante y duradero. A las ventajas de poder tratar menas de baja ley —las más abundantes en América, no rentables con el proceso de fundición y a las que además extraía mucha mayor proporción de sus contenidos en plata— y a la ausencia en él de combustibles —el método originario fue en frío y solo más tarde aparecen sistemas en caliente, que triunfan a fines del xviii— une la menor demanda de mano de obra especializada —cara—, imprescindible en las fundiciones. En 1562 se había ya difundido por todo México, hacia 1572 se practicaba en Potosí, mientras que antes llegaba a España: en 1558 se ensayaba en Guadalcanal. Como se mencionó con anterioridad, el intento de un experto procedente de esta mina de llevarlo a Europa Central —practicó experimentos en Viena y en Bohemia— terminó en un fracaso, quizá más político que técnico.

El nuevo procedimiento supuso la inmediata adopción en Nueva España y en Perú de un conjunto de nuevos artefactos. La necesidad de moler muy finamente los minerales llevaba aparejada la construcción de ingenios para la molienda. En el Potosí, la molienda se realizó al principio recurriendo a procedimientos incaicos, pero pronto, como en tantas otras fases de la minerometalurgia, la más eficiente técnica europea suplantó a la indígena ante la necesidad de moler cantidades muy altas de mineral, lo que implicaba la necesidad de realizar el trabajo en una escala mucho mayor. Allí donde era posible, la mayor eficiencia de los molinos hidráulicos de rueda vertical, caída de agua superior y piones hizo que fueran los preferidos, seguidos por los ingenios de animales, que a veces se veían obligados a sustituir a los anteriores en los periodos en que el agua escaseaba.

En el caso de Potosí, un lugar donde el régimen de lluvias es escaso, la demanda de energía hidráulica hizo preciso el desvío de una corriente de agua y la construcción de un conjunto de reservorios y canales que constituye hoy todavía el asombro de los estudiosos por su complejidad y los altos costos de inversión para su finalización. Tales embalses se edificaron valiéndose de la técnica de dique, recogiendo las aguas en cuencas naturales que cerraban por uno de sus lados con una gruesa pared. El virrey Francisco de Toledo, impulsor de dicha obra, había previsto hasta dieciocho de tales reservorios, aunque llegaron a ser veinte. La culminación de las obras llevó muchos años y aseguró la permanente actividad de la insustituible explotación de Potosí. No conocemos el origen de las técnicas utilizadas, si bien existían precedentes indígenas —los asombrosos acueductos y canales incaicos— y



13.10. Curva de producción de Potosí que muestra claramente el tremendo impacto productivo de la introducción de la amalgama (reproducido de la obra de Juan Marchena, ed., Potosí, plata para Europa, 2000).

peninsulares —en la misma época se construyeron embalses y se proyectaron canales de avanzada técnica— suficientes como para poder recurrir a ambas tradiciones.

El nuevo procedimiento planteaba algunos inconvenientes; el más importante es que ligaba a la minería americana a un insumo que en Nueva España, a pesar de múltiples intentos, no llegó a producirse nunca a lo largo del periodo colonial. Todo el mercurio debía ser importado de fuera y por tanto se convirtió en un bien escaso y caro. En el virreinato peruano se había hallado el rico yacimiento de mercurio de Huancavélica; de él se abastecerán las minas peruanas, si bien en algunos momentos no produce suficiente y es preciso importarlo desde Almadén. El transporte por el largo itinerario que desde el sur de la Mancha conducía a Sevilla y Veracruz, y de allí ascendía a puntos tan lejanos del puerto atlántico como Zacatecas, constituyó uno de los mayores retos técnicos a que tuvo que hacer frente la tecnología hispana y que fue capaz de superar con éxito. Aún mayor desafío se producía en el transporte que a través del istmo de Panamá llegaba a Arica, y desde este puerto y a través de los dificultísimos caminos andinos subía hasta los más de 6.000 m del cerro de Potosí. Pero lo que resultaba inconveniente para los empresarios mineros americanos se saldó con una ventaja para la Real Hacienda. Esta, que controlaba directamente Almadén, se incautó de Huancavélica y monopolizó así la oferta de mercurio mundial¹⁴, un bien que declaró en seguida «estancado» y a través de cuya distribución controló de forma estrecha la fiscalidad de la minería americana.

¹⁴ Solo quedaba en el mundo occidental otro yacimiento, el de Idria, ubicado en la actual Eslovenia, territorio dependiente del Imperio, de donde en los siglos siguientes, ante el crecimiento exponencial de la demanda para América, se importó también mercurio, como igualmente se intentó de forma esporádica, en una tentativa desesperada de colmar las necesidades de las minas, traerlo de China a través de Filipinas-Acapulco.



13.11. Guaira (según ilustración de la obra *Arte de los Metales*, de A. Alonso Barba) **e indios fundiendo minerales en guairas, «guairando»** (ilustración del siglo xvi, manuscrito K3, *The Hispanic Society of New York*).

Las consecuencias de la introducción de las innovaciones técnicas de mediados de la centuria fueron espectaculares. La producción argentífera es vertiginosamente ascendente en Perú entre 1570 y 1590 —de Potosí, la mina que en ese siglo controla la casi totalidad de la producción del virreinato, se extraen en los años de máxima producción más de cuatro millones de marcos de metal blanco—, mientras que comenzará a descender de forma muy lenta a partir de esa fecha. En Nueva España —con una producción mucho más descentralizada— el ascenso será constante en la segunda mitad del siglo, pero quedará lejos del *output* peruano hasta casi el siglo xviii. El éxito productivo de la minería argentífera configurará a la extracción de plata como el núcleo y eje de la economía colonial hasta la diversificación del xviii; su exportación inundará Europa con cantidades de plata hasta entonces insospechadas, con las consecuencias que son suficientemente conocidas.

Pero el éxito tuvo sus víctimas. Las inversiones necesarias para poner en marcha el procedimiento de amalgamación no estaban al alcance de aquellos indígenas que fundían minerales con sus guayras en el periodo anterior a 1575. Los españoles dueños de minas, financiados por los grandes comerciantes exportadores, desplazan a aquellos, reducidos a un grupo residual en extinción. El sector indígena, si bien se mantiene —los que no participan en la extracción, sino que compran minerales a los españoles para guairarlos— durante el resto del siglo xvi, lo hará en franco retroceso frente al hispano.

El aumento de la producción minera americana planteó en seguida el problema de la necesidad de mano de obra. La presencia de una población indígena abundante y sometida en el entorno de las minas ofrecía una solución fácil. A ella se recurrió en ambos virreinos, peruano y novohispano, si bien de forma diferente. En Nueva España, donde ya antes de 1570 se habían producido envíos obligatorios de



13.12. Alambiques en la obra de Bernardo Pérez de Vargas: *De Re Metallica* (1568).

indígenas a trabajar en minas, comienza utilizándose de forma conjunta el trabajo combinado de indios sedentarios de forma voluntaria con el trabajo forzado de indios y algunos esclavos negros. La progresiva escasez de los voluntarios frente al crecimiento del número de explotaciones determinó a partir de 1575 el empleo de indios de repartimiento —distribución obligatoria y organizada por la autoridad de trabajadores indígenas para labores consideradas de utilidad pública—. Pero donde el trabajo compulsivo adquirió una importancia mayor fue en el virreinato peruano; allí los cambios de los años 70 acarrearán una alta demanda de mano de obra no especializada a la que el virrey Francisco de Toledo, quien recibe para ello la aprobación de la Corona, hizo frente mediante la creación de una institución que luego sería famosa: la denominada «mita minera», un sistema de trabajo con antecedentes incaicos que adquiere su configuración definitiva en 1578 y permanecerá vigente, a pesar de los numerosos ataques que recibe, hasta el fin del periodo colonial.

Mediante esta institución legal de trabajo compulsivo, los indios varones y adultos debían acudir por turnos a trabajar en las minas de Potosí y Huancavélica a cambio de un salario estipulado, siempre muy por debajo del fijado por el mercado de mano de obra y que Sempat Asadourian calcula mucho menor del necesario para la supervivencia. Aproximadamente en torno al 17% de los hombres de entre 18 y 50

años debían asistir al trabajo obligatorio de forma rotativa. Si en un principio la mano de obra se reclutaba en zonas próximas —relativamente— a los yacimientos, el descenso de la población indígena obligó a buscar los mitayos en regiones cada vez más alejadas, situadas hasta a 200 leguas de Potosí, con los problemas que ello suponía de desarraigo, de choques entre etnias enfrentadas o de adaptación a climas radicalmente diferentes a los de sus pueblos de origen: por ejemplo, los yungas procedían de la selva tropical, con temperaturas y humedad muy elevadas, y se veían trasladados a los climas y la sequedad extremos de los 6.000 m de las minas potosinas.

En cualquier caso, la disponibilidad de mano de obra barata tuvo consecuencias en la evolución técnica de la minería americana: fue un freno a la evolución técnica, esencialmente de la que suponía sustitución de fuerza de trabajo humano. Un estudio de la evolución de la minería americana entre los siglos XVI al XVIII revela que la inmensa mayoría de las innovaciones se dirigen a ahorrar mercurio o a acelerar el tiempo que precisaba la amalgamación, mientras que apenas se producen invenciones para ahorrar mano de obra. No interesan porque la tecnología es más cara que los indios. Así, la extracción de mineral en Potosí no empleó máquinas, sino que utilizó siempre indios que ascendían zacas de mineral por peligrosísimas escaleras. De tal manera influyó este hecho que en la labor de mezclar el mineral molido con el mercurio —reparar— se utilizaron siempre los pies de los indios, a pesar de su

13.13. Pragmática de Su Majestad por la cual revoca las mercedes de minas y declara la parte que han de hacer los descubridores de ellas, y la orden que se ha de tener en registrarlas y beneficiarlas (1559). Emplea aún las armas de enlace de los Habsburgo de España y de Inglaterra, fruto del matrimonio de Felipe II y María Tudor, reina de Inglaterra fallecida el año anterior.



peligrosidad para la salud de los trabajadores —a causa del hidrargirismo—, y no se sustituyeron por caballos hasta el siglo XVIII; y esto solo en México, donde la mano de obra asalariada libre era ya entonces mayoritaria.

La baratura de la mano de obra —en realidad, la mita era una sustanciosa subvención de la Corona a los mineros, sin coste alguno para ella— prolongó además la vida de explotaciones cuyos rendimientos, dada la bajísima ley del mineral, las hubieran hecho inviables y que posiblemente hubieran debido abandonarse. De esta forma, los indígenas constituyeron una base esencial de la producción minera colonial.

V

A MODO DE CONCLUSIÓN

Se ha visto a la minería peninsular pasar, en la década central del siglo, del primitivismo técnico a una notable renovación por obra sobre todo de la intervención de expertos procedentes del área entonces más desarrollada, la Europa central. Pero la renovación se frustrará en el territorio peninsular a causa de dos factores: la falta de competitividad por precios diferenciales muy desfavorables respecto a la Europa más al norte y la ruptura de lazos con esa Europa que producía innovaciones; en un contexto de aislamiento, las innovaciones no llegan y se produce el estancamiento técnico. Es lo que sucede por ejemplo con la técnica para el tratamiento del cobre.

Ahora bien, cuando la técnica más avanzada se producía en lugares con los que España seguía manteniendo relaciones fluidas —el caso de Italia con respecto al azufre—, las novedades llegaban. La consecuencia no pudo ser más negativa: España tuvo que importar prácticamente todos los metales que le eran precisos, mientras que el hierro, en cuya producción ocupaba a principios de siglo un lugar puntero, llegaba a fin de siglo con una marcada crisis cuyo origen no era otro que el estancamiento tecnológico.

En cuanto a América, la innovación técnica se muestra altamente capaz de hacer frente a los retos que le plantearon las crisis de producción. El Nuevo Mundo será hábil en innovar, si bien su capacidad para hacerlo fue descompensada en la línea del ahorro de materias primas (*resource saving*) frente a la del ahorro de la baratísima mano de obra (*labour saving*); esta decisión, muy criticable desde el punto de vista ético, no lo es sin embargo desde el de la pura racionalidad económica: la minería americana se mostró capaz de producir elevadísimas cantidades de plata hasta el final de la colonia.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRICOLA, G.: *De Re Metallica*, Madrid, 1972 (ed. española).
- BAKEWELL, P.: *Minería y sociedad en el México colonial: Zacatecas, 1546-1700*, Fondo de Cultura Económica, México DF, 1976.
- *Mineros de la Montaña Roja. El trabajo de los indios en Potosí (1545-1650)*, Alianza Editorial, Madrid, 1989.
- BARGALLO, M.: *La minería y la metalurgia en la América española durante la época colonial, con un apéndice sobre la industria del hierro en México desde la iniciación de la independencia hasta el presente*, México DF, 1956.
- BIRINGUCCIO, V.: *De Pyrotechnia*, ed. de C. Stanley Smith, Cambridge, Mass., 1958.
- BONILLA, H.: *El sistema colonial en la América española*, Editorial Crítica, Barcelona, 1991.
- BRAUDEL, F.: *Civilización material y capitalismo: Siglos XVI-XVIII*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- CAPOCHE, L.: *Relación general de la villa imperial de Potosí*, ed. de L. Hanke, Madrid, 1959.
- CARANDE, R.: *Carlos V y sus banqueros*, Sociedad de Estudios y Publicaciones, Madrid, 1948-65.
- CIPOLLA, C. M.: *Historia económica de la Europa Preindustrial*, Alianza Editorial, Madrid, 1976.
- *Historia económica de Europa (siglos XVI y XVII)*, Ariel, Barcelona, 1979.
- CLARKSON, L. A.: *The pre-industrial economy in England, 1500-1750*, Batsford, 1972.
- DAUMAS, M. (dir.): *Histoire Générale des Techniques*, París, 1965.
- DELUMEAU, J.: *L'alun de Rome*, París, 1962.
- DERRY, T. K., y T. I. WILLIAMS: *Historia de la Tecnología*, Madrid, 1977.
- ELHUYAR, F. de: *Memoria sobre el influjo de la minería en la agricultura, industria, población y civilización de la Nueva España en sus diferentes épocas*, Madrid, 1825.
- GAMBOA, F. X. de: *Comentarios a las Ordenanzas de Minas*, México, 1987.
- GARCÍA TAPIA, N.: *Técnica y poder en Castilla durante los siglos XVI y XVII*, Valladolid, 1989.
- GILLE, B.: *Histoire de la Métallurgie*, París, 1966.
- GREGORY, C. E.: *A concise history of mining*, Nueva York, 1980.
- HUMBOLDT, A. von: *Ensayo político sobre el reino de la Nueva España*, México DF, 1984.
- KELLENBENZ, H.: *El desarrollo económico de la Europa continental, 1500-1750*, Madrid, 1977.
- LANG, M. F.: *El monopolio estatal del mercurio en el México colonial*, México, 1977.

- LEÓN PORTILLA, M., J. GURRIA PORTILLA, R. MORENO DE LOS ARCOS, I. MADERO y E. BRACHO: *La minería en México. Estudios sobre su desarrollo histórico*, México DF, 1978.
- LOHMANN VILLENNA, G.: *Las minas de Huancavelica en los siglos XVI y XVII*, Sevilla, 1949. (Reeditado por la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999.)
- LÓPEZ PIÑERO, J. M.: *Ciencia y técnica en la sociedad española de los siglos XVI y XVII*, Ed. Labor, Barcelona, 1979.
- (dir.): *Diccionario histórico de la Ciencia Moderna en España*, Ed. Península, Barcelona, 1983.
- MARCHENA, J. (ed.): *Potosí. Plata para Europa*, Ed. de la Caja «El Monte» Sevilla, 2000.
- MATILLA TASCÓN, A.: *Historia de las minas de Almadén*, Madrid, 1958-88.
- MISKIMIN, H. A.: *La economía de Europa en el Alto Renacimiento, 1300 a 1460*, Madrid, 1980.
- *La economía europea en el Renacimiento tardío, 1460-1600*, Madrid, 1981.
- MONARDES, M.: *Diálogo del hierro*, Sevilla, 1574.
- NEF, J. U.: *La conquista del mundo material*, Buenos Aires, 1969.
- OTHON DE MENDIZÁBAL, M.: *La minería y la metalurgia en México*, México DF, 1980.
- PARIAS, L. H.: *Historia general del trabajo*, Barcelona-México, 1965.
- PRIETO, C.: *La minería en el Nuevo Mundo*, Madrid, 1977.
- REY PASTOR, J.: *La ciencia y la técnica en el descubrimiento de América*, Madrid, 1970.
- SÁNCHEZ FLORES, R.: *Historia de la tecnología y la invención en México*, México, 1980
- SÁNCHEZ GÓMEZ, J. : *De minería, metalúrgica y comercio de metales*, Salamanca, 1989.
- *Minería y metalurgia en la Edad Moderna*, vol. 16 de la *Historia de la Ciencia y de la Técnica* dirigida por F. J. Puerto Sarmiento, Ed. Akal, Madrid, 1997.
- G. MIRA DELLI ZOTTI y R. DOBADO GONZÁLEZ: *La savia del Imperio*, Salamanca, 1998.
- y G. MIRA DELLI ZOTTI: *Hombres, Minas, Plata*, Sevilla, 2000.
- y J. PÉREZ MELERO: «Minería y acuñación», en *Historia de la Ciencia y la Técnica en la Corona de Castilla*, Junta de Castilla y León, Valladolid, 2002.
- SINGER, Ch., E. J. HOLMYARD, A. R. HALL, *et al.*: *A History of Technology*, Oxford, 1957.
- SMITH, C.S.: *Dictionary of Scientific Biography*, N.B., York, 1957.
- SONNESCHMID, F.: *Tratado de la amalgamación de Nueva España*, México DF, 1983.
- TRABULSE, E.: *Historia de la Ciencia en México*, México DF, 1983.
- VÁZQUEZ DE PRADA, V.: *Historia económica y social de España*, Madrid, 1978.
- VV. AA.: *La minería española e iberoamericana*, volumen en *Actas del I Coloquio internacional de historia de la minería*, León, 1970.