

AGUA Y CANALES EN LA MINERÍA HIDRÁULICA ROMANA DEL ORO

Roberto Matías Rodríguez¹

1. INTRODUCCIÓN

El binomio agua-oro ha sido conocido y utilizado por la Humanidad desde el inicio de los tiempos, cuando se empezaron a recoger brillantes y llamativas pepitas de oro en los márgenes de algunos ríos (fig. 1). A pesar de ser ya una actividad de aprovechamiento de recursos minerales, minería como tal, se trataba, no obstante, de pequeñas producciones destinadas a reunir algunas cantidades de una sustancia amarilla y pesada, inservible a efectos prácticos, pero que se podía moldear por golpeo, conservaba su cálido color y era muy apreciada como símbolo de distinción por las élites, relacionado con el disco solar. Durante miles de años la situación no cambió, si bien con el tiempo ya se localizó el origen de este oro en los yacimientos primarios y se obtenían también algunas producciones de sus afloramientos (fig. 2).

Los avances tecnológicos desarrollados durante el apogeo del Imperio Romano no fueron tampoco ajenos a la minería. En este campo se registraron importantes progresos en la minería subterránea del cobre y de la plata, ésta asociada al plomo, que todavía pueden hoy admirarse en las extensas explotaciones del sur de la Península Ibérica (Río Tinto, Cartagena, Sierra Morena, etc.). Pero es en el campo de la minería del oro, utilizado para joyería (fig. 3) y acuñación de moneda (fig. 4) donde se realizaron las principales innovaciones y alcanzaron unas cotas que no serían superadas tecnológicamente hasta muchos siglos más tarde, ya con la introducción de los explosivos y la maquinaria de vapor en las labores mineras. Simplemente mediante la utilización del agua (minería hidráulica), en un proceso que replica la actividad de

1. Doctor Ingeniero de Minas. Correo electrónico: matiasr.roberto@gmail.com.



Fig. 1. Pepitas de oro del río Duerna (León) obtenidas mediante la técnica de bateo. Encuadre de 20mm.



Fig. 2. Oro en cuarzo procedente del yacimiento primario de Andiñuela (León). Encuadre de 15mm.



Fig. 3. Arracada de oro. Museo de Astorga. Foto: Imagen MAS.



Fig. 4. Moneda de oro romana: As de Augusto. Museo de Astorga. Foto: Imagen MAS.

diversos fenómenos naturales, los romanos fueron capaces de conseguir llegar a procesar industrialmente millones de toneladas de materiales rocosos para extraer el oro que contenían, en un alarde de ingenio y sentido práctico, que dio lugar al nacimiento pleno de la Ingeniería de Minas como disciplina, puesto que nunca antes se había acometido la explotación de los recursos minerales de un extenso territorio desde un punto de vista tan amplio y sistemático.

Una vez localizados los yacimientos, los romanos se enfrentaron con éxito al problema del abastecimiento de agua en sus trabajos de minería hidráulica construyendo canales de gran capacidad, que llegaron a

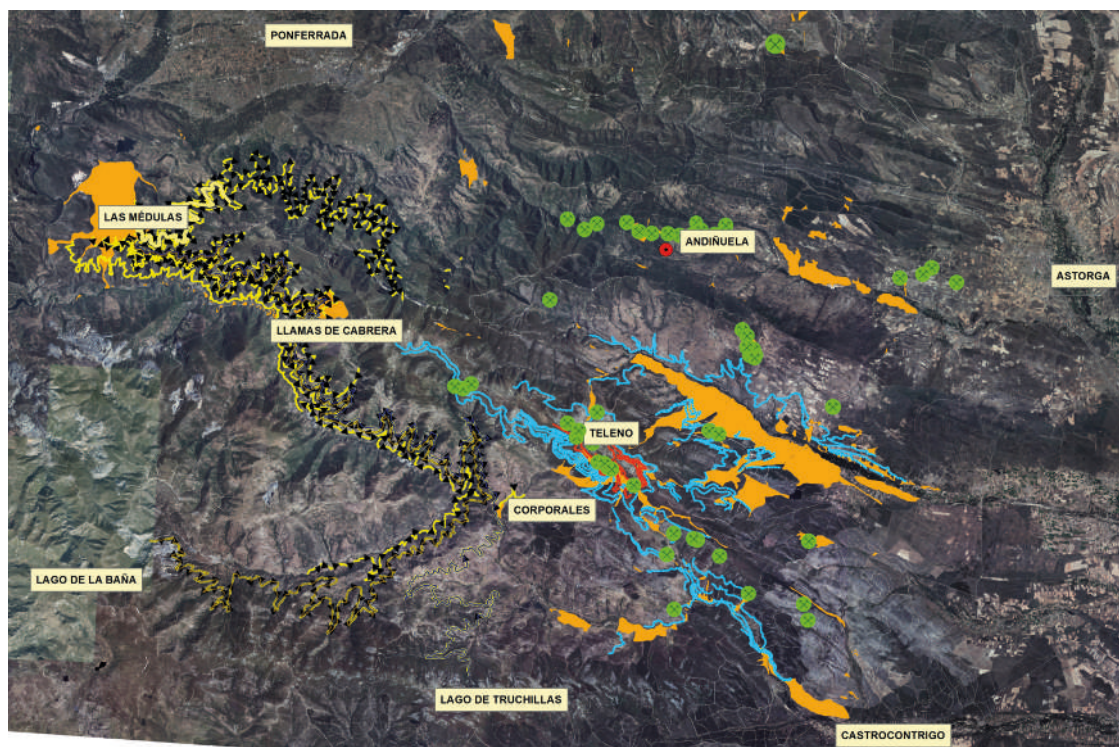


Fig. 5. Minería de oro romana en el sector Médulas-Teléfono. Se han representado las redes hidráulicas (amarillo, azul y rojo), minería aurífera (círculos verdes) y aluviones auríferos (naranja).

superar en ocasiones el centenar de kilómetros, realizaron trasvases de cuencas hidrográficas y aprovecharon hasta el límite las posibilidades hídricas del territorio del Noroeste Hispano, la principal área de actividad de la minería hidráulica romana, donde se encuentran sus ejemplos más representativos (fig. 5).

2. NECESIDADES DE AGUA EN LA MINERÍA HIDRÁULICA ROMANA

Podemos resumir en una sola frase la esencia de todo este concepto: “sin agua no hay oro”. Y es que el binomio oro-agua es una realidad en la minería aurífera de todos los tiempos. Plinio su *Historia Natural* hace una sutil descripción del abastecimiento de agua para la minería de oro romana, donde expresa con mucha claridad esta circunstancia:

(74). *Hay otro trabajo similar o incluso de mayor coste: a la vez condujeron desde las cimas de las montañas, generalmente desde una distancia de cien millas, corrientes de agua para lavar este derrubio. Se llaman corrugos, proveniente de contrivatio, a mi parecer. También aquí los trabajos son muy diversos: conviene que la nivelación esté en pendiente para que (sc. el agua) corra apresuradamente mejor que fluya; así pues, se trae de zonas muy altas. Las gargantas y crestas se unen con*

canales apoyados sobre cimientos. En otros lugares se cortan las rocas inaccesibles y se las dispone para proporcionar asiento a troncos colocados en huecos.

(75). Quienes hacen los cortes están colgados con cuerdas, de modo que a quien observa de lejos ni siquiera le parecen animales salvajes, sino pájaros. Suspendidos en el aire, nivelan y trazan las líneas del recorrido en su mayor parte, y se canalizan las aguas por donde no hay lugar para las pisadas del hombre. Surge una dificultad en el proceso de lavado, si la corriente de agua produce barro; este tipo de terreno se llama urio. En consecuencia, la conducen por rocas y piedras y evitan el urio. En la parte más alta desde la que se vierte el agua, en las crestas de los montes, se cavan estanques de doscientos pies por cada lado y diez de profundidad. En ellos se dejan cinco desagüaderos de unos tres pies cuadrados a fin de que, lleno el estanque, una vez retirados los cierres el torrente irrumpa con tanta fuerza que arrastre las rocas. (Plin. Nat. 33.74-75; trad. Pérez González – Matías Rodríguez 2008).

El agua es el elemento primordial para proceder a la concentración gravimétrica y separación de las partículas de oro de los materiales que las contienen. El oro se encuentra en la mayoría de los yacimientos secundarios en una proporción generalmente menor de 1:1.000.000, que corresponde con 1 g/tm (1 ppm), por lo que el símil de “buscar una aguja en un pajar” sería muy apropiado en este caso. Si añadimos que el tamaño habitual del oro en la mayoría de yacimientos es milimétrico o submilimétrico, se entiende rápidamente que la recuperación manual es inviable o poco práctica, aún por el sencillo procedimiento de la batea.

Sin embargo, la elevada densidad del oro (19,3 g/cm³) frente a los materiales que le acompañan (2-2,5 g/cm³) permite que el proceso de concentración gravimétrica alcance unos rendimientos adecuados, incluso para casos de apenas unas decenas de miligramos por tonelada. Para que la separación y recuperación del oro tenga lugar es necesario convertir todo el material en una suspensión acuosa de barro y rocas que se hace circular por un dispositivo adecuado (canal de lavado), equipado con unos sencillos mecanismos de retención (lechos de piedras, ramas, incluso pieles de animales, de donde viene la leyenda del Velloccino de Oro), situado siempre a favor de la pendiente para que los lodos fluyan adecuadamente. De este modo tiene lugar una concentración gravimétrica de las partículas de oro y otros minerales pesados, que quedan retenidos en el fondo. Este material de color oscuro se recuperaba posteriormente, una vez interrumpido el flujo, para ser procesado ahora utilizando el método ancestral de la batea. Técnicamente, la longitud del canal de lavado tiene que diseñarse en proporción al tamaño de las partículas, para obtener la máxima recuperación. Como regla general (Longridge 1910), se necesitan unos pocos metros para yacimientos con mayoría de pepitas grandes (≥ 1 mm) y decenas de metros para yacimientos con tamaños de pepitas pequeños (< 1 mm). Se han empleado entre los siglos XIX y XX adiciones de mercurio en las cajas y también chapas de cobre amalgamadas para retener las partículas de oro más finas. El mercurio se encuentra hoy en desuso por la contaminación ambiental que provoca su empleo.

Los más grandes yacimientos de oro explotados por los romanos fueron de tipo “secundario”, es decir, procedentes de la denudación natural de los filones de cuarzo aurífero (yacimientos primarios) y su posterior arrastre y acumulación sobre el terreno debida a la actuación de los agentes geológicos externos.



Fig. 6. Depósitos auríferos de Las Médulas. Vista desde el Mirador de Orellán.



Fig. 7. Corte en la roca del canal C-1 de Las Médulas. Estado actual. Llamas de Cabrera (León).



Fig. 8. Canal C-1 de Las Médulas. Captación del río Cabrera en las proximidades de Encinedo (León).

Este tipo de yacimientos, salvo los que se encuentran en las inmediaciones de los cursos fluviales, la mayoría de las veces ocupan extensiones importantes de terreno en lugares elevados, muy alejados topográficamente de los principales cursos de agua, tras la profundización natural de estos a lo largo de miles o millones de años, en donde han podido intervenir además procesos tectónicos. Los volúmenes de materiales auríferos de estos depósitos pueden alcanzar órdenes de varios cientos de millones de metros cúbicos. Por lo general, la distribución del oro en la masa de sedimentos no es uniforme, tendiéndose a concentrar en las partes bajas de los diferentes niveles del depósito (fig. 6).

Ante esta situación, existen dos posibilidades de explotación minera: la primera sería llevar el material aurífero hasta donde hay agua, si su riqueza lo permite, algo que llega a suceder en contadas ocasiones. La segunda es llevar el agua hasta el yacimiento y procesar el material prácticamente in situ. La mayoría de los casos se encuentran en esta segunda situación, que necesita de la construcción de una red de canales, cuya extensión y características constructivas están determinadas por la topografía del terreno y las dimensiones del área mineralizada.

3. CANALES DE ABASTECIMIENTO

En la minería hidráulica romana los canales abiertos de sección rectangular fue la solución elegida sistemáticamente por los ingenieros romanos para garantizar la disponibilidad de agua en el proceso de recuperación del oro en los yacimientos secundarios (fig. 7). El conocimiento que tenemos actualmente de los canales de abastecimiento a las minas romanas está basado en el análisis cartográfico y la reconstrucción topográfica de más de 1300 km de redes de canales

realizadas para minas importantes como Las Médulas, Llamas de Cabrera, Teleno y otras. Todos estos estudios parten de la cartografía inicial realizada en los canales de la mina de oro romana de Llamas de Cabrera, de más de 26 km, (Matías Rodríguez – Gómez Fernández 2003; Matías Rodríguez 2008), a la que siguieron otras como las de Las Médulas, de 700 km (Matías Rodríguez 2004; 2006b; 2008a; 2019); Sierra del Teleno, de más de 150 km (Matías Rodríguez 2006); área Salientes-Villablino, 26 km (Matías, Rodríguez 2013); Velilla del Río Carrión, de 60 km (Matías Rodríguez 2012) o la mina de Las Murias-Los Tallares de Castrocontrigo, de 26 km (Matías Rodríguez – Llamas Moya 2017), entre otros trabajos (Pérez González – Matías Rodríguez 2013; Matías Rodríguez *et al.* 2014; Matías Rodríguez – Llamas Moya 2019).

La reconstrucción topográfica de un canal permite obtener importantes datos como la cota de trabajo en la mina, distancia de trazado y su pendiente, así como la variación de esta por diferentes condicionantes del relieve o la intencionalidad de sus constructores. De este modo, con estos valores ya estamos en condiciones de analizar el volumen de abastecimiento posible y la operatividad de la red hidráulica dentro de la explotación minera, donde hay que tener siempre en cuenta que, casi sin excepción, los trabajos se realizan desde las cotas inferiores hacia las superiores.

3.1. DISEÑO

Los canales de minería fueron concebidos como estructuras lineales de conducción de agua de sección rectangular, destinadas en general a la captación de las principales fuentes de abastecimiento (ríos) que garantizaran un suministro continuo y regular de agua en cualquier época del año (fig. 8). Por lo general, los canales han sido realizados partiendo de las cotas de utilización en la mina hacia los puntos de captación de agua, si bien existen otras circunstancias diferentes que se tratarán más adelante.

A lo largo de estos años de investigación hemos podido apreciar que tanto la pendiente de trazado como las anchuras de excavación se mantienen dentro de unos parámetros predeterminados y específicos. Así, las grandes minas disponen de canalizaciones de hasta 1,20-1,35 m de anchura media (fig. 9), mientras que, bajando un orden de magnitud, los canales se construyen ya de 0,90 m, llegando hasta los de 0,40 m y menos (fig. 10) en el caso de los de corto recorrido o abastecimiento nival (Matías Rodríguez 2006a, 240). No obstante, la medición exacta de la anchura de un canal es una ardua tarea que puede resultar infructuosa si no se encuentran tramos cortados directamente en la roca y en un estado adecuado. En las observaciones realizadas sobre el terreno se aprecia que debido a la falta de homogeneidad de los materiales en los que se realiza la excavación las anchuras de caja presentan variaciones, que a veces pueden parecer importantes. Sin embargo, esas variaciones, que para un canal de anchura media de 1,20 m pueden alcanzar los 1,80-2,00 m, o reducirse a los 0,90 m, sólo se han encontrado en tramos de apenas unos metros de recorrido, generalmente condicionados a las irregularidades de las rocas donde se realiza la excavación de la caja, en la que se persigue el mantenimiento de una superficie lo más recta y lisa posible, con ángulos de 90° sistemáticamente mantenidos entre las paredes y el fondo del canal.



Fig. 9. Sección del canal C-4 en el Puerto de Peña Aguda (Corporales-León).



Fig. 10. Sección de un canal de abastecimiento nival en la vertiente sur del Teleno.

La pendiente media de los canales de minería hidráulica romana se mantiene generalmente constante, independiente por lo general de la anchura de caja, con valores medios que oscilan entre el 0,2 y el 0,3 %. Estos datos se han podido medir con precisión en los canales de Las Médulas (Matías Rodríguez 2008a) gracias a su largo recorrido. Actualmente ya es posible realizar mediciones muy precisas de la pendiente en tramos cortos utilizando los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos a partir de los datos LIDAR (Matías Rodríguez – Llamas Moya 2017; 2019). No obstante, las irregularidades del fondo del canal siempre pueden enmascarar los resultados, como se aprecia en los tramos excavados y dejados al descubierto del canal C-1 de Las Médulas en Llamas de Cabrera (Valle Lleiroso), donde el fondo del canal presenta incluso diversos escalones. Durante el funcionamiento estas irregularidades serían rellenadas por los sedimentos finos que arrastraba el agua, haciendo que la superficie de rozamiento fuese mucho más suave (fig. 11).

3.2. CONSTRUCCIÓN

Aunque la vista más espectacular de los canales de minería hidráulica romana es la de los cortes producidos en el terreno cuando se tienen que atravesar farallones rocosos, la mayor parte del trazado se realiza excavando parcialmente la caja en la ladera de la pendiente y preparando un muro de cierre exterior, firmemente asentado en el terreno mediante sendos escalones, tallados a ser posible en la roca firme (fig. 12). Este muro de cierre sirve a la vez como de corredor de servicio para permitir eventuales reparaciones y un correcto mantenimiento. El muro se realiza de mampostería en piedra, aprovechando en todo momento los diversos materiales del terreno circundante. En el estado actual de las investigaciones no se han encontrado evidencias de haber utilizado un revestimiento impermeabilizante, si bien se ha constatado en algunos puntos que la cara interior del muro del canal en contacto con el agua tiene las juntas realizadas con tierra como agente de impermeabilización.



Fig. 11. Corte en la roca del canal C-1 de Las Médulas donde se aprecian las irregularidades del fondo. Estado actual. Llamas de Cabrera (León).

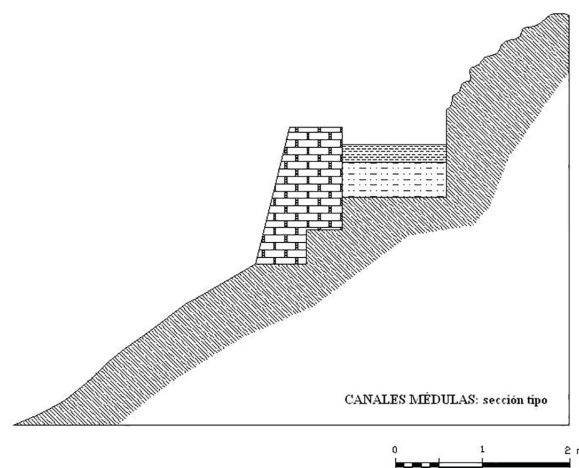


Fig. 12. Sección tipo de un canal de minería hidráulica romana.

A primera vista la construcción de canales de estas características puede parecer una tarea sencilla, pero cuando hablamos de grandes longitudes de trazado y pendientes tan reducidas y precisas, en condiciones topográficas muy adversas, la tarea ya adquiere otros niveles de dificultad. Encontramos en el texto de Plinio el siguiente párrafo relativo la construcción de los canales, que reproducimos aquí de nuevo:

(74) (...) *Las gargantas y crestas se unen con canales apoyados sobre cimientos. En otros lugares se cortan las rocas inaccesibles y se las dispone para proporcionar asiento a troncos colocados en huecos.*

(75). *Quienes hacen los cortes están colgados con cuerdas, de modo que a quien observa de lejos ni siquiera le parecen animales salvajes, sino pájaros. Suspendidos en el aire, nivelan y trazan las líneas del recorrido en su mayor parte, y se canalizan las aguas por donde no hay lugar para las pisadas del hombre.* (Plin. Nat. 33.74-75; trad. Pérez González – Matías Rodríguez 2008).

Sobre el controvertido aspecto de los “troncos ahuecados”, traducción literal del texto de Plinio en todas sus versiones (Pérez González – Matías Rodríguez 2008), es posible observar múltiples evidencias en el terreno de los encajes destinados a la colocación de los troncos (fig. 13) que permitían la construcción del canal por encima para permitir el paso por algunos lugares escarpados, sin necesidad de realizar una sobre excavación de la caja. Evidentemente, se trata de pequeños tramos de apenas 2-3 m, realizados para salvar obstáculos puntuales en terrenos muy escarpados. Si el obstáculo es mayor, se realizaba ya una excavación en semitúnel, lo más habitual, o túnel directamente, aunque con mucha menor frecuencia.

Por las huellas de los picos dejadas en el terreno se aprecia que la excavación de la caja del canal fue realizada en varias fases (hasta tres se han podido constatar) de tal forma que podemos asegurar que hubo un trazado inicial nivelado que precisó de un desbroce del terreno sobre el que excavar posteriormente,



Fig. 13. Encajes para el asiento de troncos en la construcción del canal (Villalibre-León).

seguido de una primera fase de nivelación gruesa que precede a una nivelación más precisa que da al canal su acabado final. Las técnicas topográficas empleadas (Moreno Gallo 2004) resultaron muy efectivas y sorprenden, al día de hoy, por los resultados conseguidos al enfrentarse a nivelaciones tan precisas en terrenos tan difíciles.

3.3. CAPACIDAD DE TRANSPORTE

La combinación del dato de la pendiente y la geometría constructiva de un canal permite ya un cálculo aproximado de la velocidad del agua y, por tanto, conocer la capacidad de suministro. Su cuantificación teórica exacta es un problema aún por resolver para la moderna ingeniería hidráulica debido a las específicas condiciones del flujo del fluido que dificultan el cálculo de la velocidad real, ya que no se trata de un flujo laminar puro, sino que este se realiza en condiciones de turbulencia. Sin embargo, los resultados empíricos de múltiples experiencias realizadas desde mediados del siglo XIX han permitido un cálculo teórico bastante preciso de los caudales en función de las características del canal, teniendo en cuenta para ello los parámetros más importantes: dimensiones, pendiente y naturaleza de las paredes y fondo de la conducción.

El flujo del agua en estos canales abiertos tiene lugar por la acción de la fuerza de la gravedad sobre la masa del fluido, no actuando a favor otras fuerzas que las ejercidas por el propio peso. En contra del movimiento del agua actúan las fuerzas de rozamiento del agua con las paredes y el fondo que se oponen al flujo continuo del líquido hacia las zonas de menor energía potencial y que determinan la velocidad del fluido. Un ejemplo natural de este fenómeno de flujo serían los ríos y arroyos, aunque en ellos las sec-

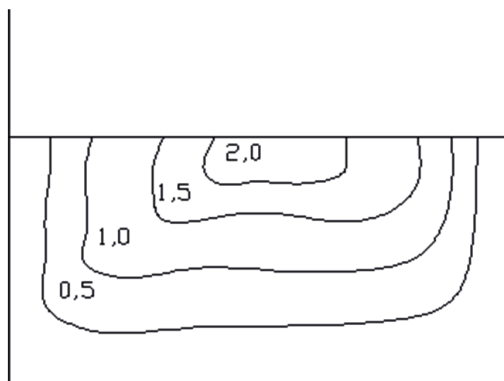


Fig. 14. Distribución de velocidades en la masa de agua de un canal de sección rectangular.

ciones no son en absoluto regulares, como en los conductos artificiales, la pendiente es variable y el rozamiento resulta muy importante a consecuencia de la vegetación y la naturaleza del lecho.

La combinación del peso propio del agua con la inclinación del fondo del canal hace que el agua fluya hacia los puntos de cota inferior, convirtiéndose la energía potencial de la masa de agua en energía cinética. Al tratarse de conductos abiertos de pendiente sensiblemente constante y geometría homogénea, la velocidad del flujo es uniforme y está condicionada a las fuerzas de oposición que surgen del rozamiento con el fondo y las paredes

del canal. A efectos de cálculos hidráulicos, la presión atmosférica es sensiblemente constante, por lo que no es necesario introducirla en los desarrollos matemáticos.

Dentro del propio canal la velocidad del agua no es la misma en toda su masa, pues el roce con las paredes laterales y el fondo hace que allí sea apreciablemente más lenta, tanto más cuanto mayor sea la rugosidad de los materiales (fig. 14). La relación entre las velocidades que se pueden medir en las distintas secciones y la velocidad media efectiva se establece experimentalmente, aunque siempre existen ciertos márgenes de error. En todo caso, la proporcionalidad entre la profundidad de la lámina de agua para una misma sección y el caudal de flujo no es una magnitud lineal, disminuyendo notablemente el caudal a medida que se va haciendo menor la lámina de agua por causa del predominio en mayor medida de las fuerzas de rozamiento sobre la masa de fluido.

Cuando el agua está en movimiento uniforme en un canal, las fuerzas de rozamiento se encuentran en equilibrio y se establece una velocidad media de flujo V , cuyo cálculo teórico nos permitirá determinar el caudal Q en función de la sección S , según la expresión: $Q = V \cdot S$

El cálculo de la velocidad real de flujo en canales abiertos es una cuestión ya abordada desde hace mucho tiempo y cuya resolución parcial fue conseguida experimentalmente para el caso del agua en 1775 mediante la fórmula sugerida por el ingeniero francés A. Chezy.

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

V (velocidad)

C (coeficiente de Chezy)

R (radio hidráulico: cociente entre la sección S y el perímetro mojado P)

I (pendiente del canal)

En un primer momento, debido a lo limitado de los datos disponibles, Chezy pensó que el coeficiente C, obtenido experimentalmente con mediciones de la velocidad, era una magnitud constante. Investigadores posteriores hallaron que C es función de tres factores: I, R y n (grado de rugosidad de las paredes y fondo del canal).

De esta forma, progresivamente, fueron apareciendo distintas fórmulas y métodos para el cálculo del coeficiente C, como las que se relacionan brevemente a continuación:

- Fórmula de Kutter-Ganguillet (1889):

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{I} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}} \left(23 + \frac{0,00155}{I} \right)}$$

Donde el valor de n (coeficiente de aspereza de las paredes del canal) fue estimado experimentalmente en 12 categorías (King – Brater 1962, 253):

- n = 0,009 para madera bien cepillada
- n = 0,010 para cemento puro
- n = 0,011 para mortero de cemento con 1/3 de arena
- n = 0,012 para madera sin cepillar
- n = 0,013 para sillería y obra de ladrillo bien colocado
- n = 0,015 para obra basta de ladrillo
- n = 0,017 para mampostería concertada
- n = 0,020 para canales hechos en grava firme
- n = 0,025 para canales y ríos en buenas condiciones
- n = 0,030 para canales y ríos con piedras y hierbas
- n = 0,035 para canales y ríos en malas condiciones

- Fórmula de Manning (1890):

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[6]{R}$$

- Fórmula de Bazin (1897):

$$C = \frac{87}{1 + \frac{Y}{\sqrt{R}}}$$

Donde los valores del coeficiente Y están englobados en 6 categorías, de 0,06 a 1,75

Existen todavía otras muchas fórmulas de idéntica aplicación, aunque las más utilizadas son las tres aquí expuestas anteriormente (Forchheimer 1935, 155-187; King – Brater 1962, 238-268). Por razones eminentemente prácticas, en los cálculos hidráulicos realizados para hallar la velocidad del agua se ha utilizado la fórmula de Chezy en combinación con la fórmula de Manning, una de las más empleadas por la mayoría de los autores:

$$Q = V \cdot S \quad V = C \cdot \sqrt{R \cdot I} \text{ (Fórmula de Chezy)}$$

C es un coeficiente que depende de las características dimensionales y constructivas del canal y su cálculo se realiza mediante la fórmula de Manning:

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[6]{R} \text{ Fórmula de Manning}$$

(n = coeficiente de rugosidad de las paredes del canal)

Sustituyendo C en la fórmula de Chezy:

$$V = \frac{1}{n} \sqrt[3]{R^2} \cdot \sqrt{I} \text{ (expresión más habitual de la fórmula de Manning)}$$

Para determinar teóricamente la capacidad hidráulica de los canales de minería romana se han de tener en cuenta los parámetros constructivos que intervienen en la aplicación de la expresión de Manning para el cálculo de la velocidad del agua. Con posterioridad se han de matizar también las peculiares características de los canales una vez puestos en servicio, como aquellas relativas al mantenimiento, infiltración, evaporación, nivel de sedimentos de fondo, etc. Analizaremos a continuación los principales parámetros que intervienen en el cálculo:

Anchura (L): considerada constante en todo el recorrido. Depende de cada canal.

Rugosidad (n): coeficiente $n = 0,030$, correspondiente a un material de las paredes del canal con un carácter mixto, intermedio entre la roca excavada y la construcción del asiento y pared exterior con lajas de piedra (mampostería). El cambio de materiales en las paredes y fondo del canal afecta notablemente a la velocidad del agua, pero como es una constante constructiva para todos los tramos del trazado de la red hidráulica, se ha elegido también en este caso el coeficiente de rugosidad más desfavorable.

Pendiente (I): pendiente media calculada de cada canal. Es importante tener en cuenta que, para este valor, cada incremento de 0,5 metros por kilómetro (0,0005 ó 0,05 %) supone un aumento de caudal del 7 %, de ahí la importancia de una medición precisa.

Lámina de agua (h): en el estudio realizado sobre el caudal de los canales de Las Médulas se ha establecido para los cálculos hidráulicos un intervalo de funcionamiento del canal con 0,40 – 0,60 m de lámina de agua como nivel de trabajo habitual para canales de 1,20 m. La variación de la lámina de agua respecto

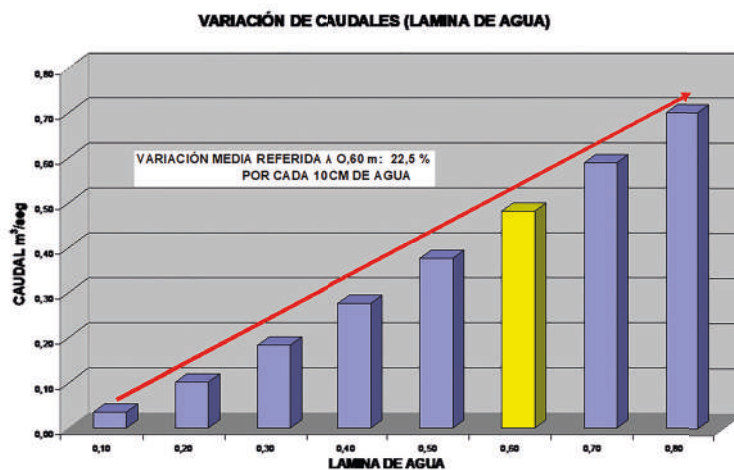


Fig. 15. Variación del caudal con la lámina de agua, referido a un nivel de llenado de 0,60 m.

a una altura máxima de 0,60 m, cada 10 cm menos de altura de agua se registra una variación de caudal del 22,5 %, cifra realmente significativa ya que a 0,40 m de lámina de agua el caudal se llega a reducir casi a la mitad (fig. 15). Queda claro que la altura de lámina de agua es el factor más crítico sobre el que es necesario incidir para garantizar el suministro de caudal adecuado a las características constructivas de los canales, lo que justificaría y obligaría a un cuidado mantenimiento de las redes hidráulicas en todo su trazado para evitar las pérdidas de caudal producidas por una posible obstrucción, reboses por una sedimentación excesiva o, incluso, la eventual rotura de las paredes del canal.

Algunos autores han propuesto anteriormente una lámina de agua sorprendentemente reducida de apenas 10 cm para canales de gran anchura como los de Las Médulas (Sánchez-Palencia Ramos – Pérez García, 2000, 200; Sánchez-Palencia Ramos – Sastre Prats 2002, 245; Pérez García 2001, 50), basándose únicamente en el pulimento observado sobre el fondo del canal, sin tener en cuenta ningún otro tipo de consideración. La velocidad del agua tendría que ser mucho más alta, y, por lo tanto, la pendiente, para poder poner en suspensión partículas sólidas suficientemente gruesas como para erosionar las paredes del canal; de este modo, el pulimento del fondo del canal se ha hecho por rodadura de las arenas y gravas arrastradas por la corriente del canal (fig. 16), con cierta independencia de la altura de su lámina de agua, razón por la cual este criterio no puede ser válido.

Un hecho importante que ahora resulta muy evidente tras la realización de las primeras topografías de detalle de los canales de minería romana es la gran longitud de que fueron dotados algunos canales con el objetivo de la captación directa de ríos muy caudalosos, cuando un suministro con tan solo 10 cm de altura de lámina de agua pueden proporcionarlo los arroyos del entorno de muchas de las explotaciones.



Fig. 16. Pulimento del fondo del canal por rodadura de sedimentos arenosos.

Para resolver definitivamente esta importante cuestión ha sido necesario recurrir a las muchas evidencias que se han conservado en algunos puntos de las alturas del muro de cierre tallado en la roca y también a los voladizos dejados en la roca cortada para permitir el paso del agua (semitúneles), evitando así la realización de un trabajo innecesario (figs. 17/18). El análisis de estas estructuras nos permite apreciar con total claridad que la lámina de agua estaba limitada constructivamente a un máximo de 0,70-0,80 m, por lo que se podría considerar como lámina de agua de funcionamiento óptimo, en su máxima capacidad, los 0,60 m, para unas condiciones adecuadas de mantenimiento del canal en todo su recorrido. Sin embargo, han de tenerse en cuenta las grandes longitudes de trazado y las características hidrogeológicas de la zona, con una abundante escorrentía superficial y fuertes pendientes, que dificultarían en gran medida este mantenimiento debido a los frecuentes arrastres del terreno, caída de restos vegetales o paso de animales, etc. De este modo, un dato en principio más realista sobre la altura efectiva de la lámina de agua sería el de 0,40 m., aunque las dimensiones constructivas permitan índices claramente superiores. Con este criterio, los cálculos se han realizado para las dos condiciones de llenado (fig. 19).

Debido a la pureza del agua, que circula en su mayor parte por terrenos de naturaleza silíceas, el nivel de llenado de los canales no puede ser determinado por la huella dejada en las paredes, ya que no se depositan incrustaciones calcáreas. Sin embargo, a este respecto, con posterioridad a la determinación de la lámina de agua, hemos conocido el caso de un canal de abastecimiento tallado en la roca calcárea, donde sí es posible apreciar con claridad la huella del nivel de llenado del canal. Se trata del túnel (Cueva) de la Gerijuela, en las inmediaciones de la localidad de Velilla del Río Carrión (Matías Rodríguez 2012, 29),



Fig. 17. Voladizo en semitúnel que limita el paso del agua. Canal C-3 en las inmediaciones de la Virgen del Valle (Llamas de Cabrera-León).



Fig. 18. Excavación en voladizo. Canal C-3 en Saceda (León).

EXPLORACIÓN DE LAS MÉDULAS:							
DISPONIBILIDAD DE AGUA (m ³)							
FASE INICIAL DE LA EXPLOTACIÓN							
RED NORTE	Km	Q _{0,40}	Q _{0,60}	DÍA	MES	AÑO	OBSERVACIONES
CN-1	71,7	0,262	0,456	22637 / 39408	688536 / 1198660	8262432 / 14383920	Canal inicial norte
RED SUR	Km	Q _{0,40}	Q _{0,60}	DÍA	MES	AÑO	OBSERVACIONES
C-0	45	0,262	0,456	22637 / 39408	688536 / 1198660	8262432 / 14383920	Canal inicial sur
C-1	95	0,239	0,417	20650 / 36024	628092 / 1095730	7537104 / 13148760	Aporte principal
(C-2)	35	0,231	0,402	19958 / 34728	607068 / 1056310	7284816 / 12675720	Canal incompleto
TOTAL ACUMULADO				0,09/0,15 Mm³	2,61 / 4,55 Mm³	31,35 / 54,59 Mm³	
FASES INTERMEDIA Y FINAL DE LA EXPLOTACIÓN							
RED NORTE	Km	Q _{0,40}	Q _{0,60}	DÍA	MES	AÑO	OBSERVACIONES
CN-1bis	19,3	0,262	0,456	22637 / 39408	688536 / 1198660	8262432 / 14383920	Aporte estacional
CN-2	57,7	0,327	0,569	28253 / 49152	859316 / 1495040	10312272 / 17940480	Aporte auxiliar
RED SUR	Km	Q _{0,40}	Q _{0,60}	DÍA	MES	AÑO	OBSERVACIONES
C-3	143	0,283	0,493	24451 / 42600	743724 / 1295750	8924688 / 15549000	Aporte principal
C-4	81	0,355	0,618	30672 / 53400	932940 / 1624250	11195280 / 19491000	Aporte principal
C-5	41	0,410	0,713	35424 / 61608	1077480/1873910	12929760 / 22486920	Aporte auxiliar
TOTAL ACUMULADO				0,14/0,25 Mm³	4,29 / 7,49 Mm³	51,62 / 89,85 Mm³	

Fig. 19. Cálculo del volumen de agua suministrado por los canales de Las Médulas.

perteneciente al trazado del canal romano de 21,5 km conocido como Camino de Los Moros. El dato de altura de lámina de agua es de 0,40-0,45 m, concordante con lo que se había observado anteriormente en el terreno con otros criterios en lugares diferentes.

Otro factor importante a contemplar para el cálculo final de los caudales son las pérdidas por infiltración y evaporación. En la construcción de los canales no se han observado hasta ahora revestimientos de mortero u otros materiales para garantizar una mayor impermeabilización. Estas pérdidas por infiltración tuvieron que ser significativas en la mayor parte del recorrido, dados los materiales utilizados en la construcción y las grandes longitudes de trazado, a lo que hay que añadir la escasa velocidad del agua (por ejemplo, el agua del canal C-3 de Las Médulas, de 143 km, tardaría 2,6 días en recorrer la distancia existente entre la captación y el yacimiento). A modo de ejemplo, sin poderse precisar por ahora el grado de infiltración, el mismo canal C-3, en los 143 km de recorrido, presenta una superficie mojada susceptible de experimentar filtraciones de 343.200 m² (34,32 has), constituida por los materiales rocosos compactos sobre los que se excava la caja en el terreno, pero también, en igual o mayor proporción, por los elementos sueltos empleados en la construcción de los muros de cierre.

Por otro lado, las pérdidas por evaporación en las épocas estivales, cifradas aproximadamente en 1 l/seg por Ha (Liria Montañés 2001, 24), también pueden alcanzar cierta entidad por iguales motivos que la infiltración: longitudes de recorrido elevadas y la velocidad escasa. Utilizando también el caso del canal C-3 como ejemplo, las pérdidas por evaporación estarían referidas a una superficie de 171.600m² (17,16 hectáreas), lo que llegaría a suponer en la descarga del canal tras todo su recorrido un déficit de caudal de 17,16 l/seg., que representaría un porcentaje del 3,50-5,91 % de su caudal efectivo, estimado en 0,29-0,49 m³/seg, referido a una lámina de agua de 0,40-0,60 m (Matías Rodríguez 2008a).

Como es lógico, para todo este volumen de pérdidas hay que tener muy en cuenta la notable abundancia de arroyos y manantiales en su trazado que, a pesar de ser un problema constante para la integridad de los canales en épocas de lluvias y deshielos, bien pudieron compensar porcentajes muy elevados de las pérdidas, contribuyendo así a garantizar el caudal efectivo a lo largo de todo el recorrido hasta los depósitos de regulación de las zonas de descarga del yacimiento.

Ya desde otro punto de vista, las variaciones estacionales influirían también tanto en el aspecto hidráulico como en el logístico, obligando a un mantenimiento mucho más exhaustivo en las épocas invernales o de fuertes lluvias, sin otros problemas para el abastecimiento de agua que conseguir mantener la integridad del canal para conservar la máxima lámina de agua posible. Por el contrario, en el período estival, incluso garantizando los ríos un llenado pleno del canal en su captación, deberían de tenerse especialmente en cuenta las pérdidas por infiltración para compensar el menor caudal procedente de los arroyos de ladera.

Atendiendo a las propiedades hidráulicas de estos canales de sección rectangular, resulta una coincidencia muy interesante el hecho de que, técnicamente, podemos calcular de forma teórica mediante un sencillo desarrollo matemático la sección de máximo rendimiento, aquella en la que el radio hidráulico R (cociente entre la sección S y el perímetro mojado P) sea máximo, que es la que corresponde con la del mínimo perímetro mojado (López Andrés 1997, 335):

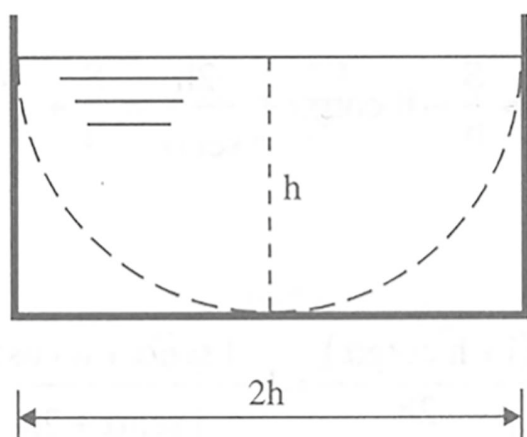


Fig. 20. Sección de máximo rendimiento de un canal rectangular.

Radio hidráulico R: S/P

$$P = L + 2h = \frac{S}{h} + 2h$$

$$\text{de donde } \frac{dP}{dL} = -\frac{S}{L^2} + 2 = 0 \rightarrow S = 2h^2$$

Donde: P : perímetro mojado
L : anchura del canal
h : altura de lámina de agua

S : sección efectiva ($L \cdot h$)

Como $S = L \cdot h$

$$L \cdot h = 2h^2 \rightarrow L = 2h$$

(sección de máximo rendimiento)

El máximo rendimiento constructivo de los canales de sección rectangular se consigue con una profundidad igual a la mitad de su ancho, que es precisamente la profundidad óptima de trabajo con la que se está trabajando, en función de las evidencias del terreno. Mediante las observaciones anteriores sobre los parámetros constructivos se ha llegado a la conclusión que la anchura efectiva de los canales más grandes es de 1,20 m, con una altura de lámina de agua que podría llegar a alcanzar con cierta facilidad los 0,60 m, lo que coincide con la utilización en la construcción de los canales de minería hidráulica romana del diseño técnico de máximo rendimiento (fig. 20).

3.4. SOLUCIONES TÉCNICAS A DIVERSOS PROBLEMAS

3.4.1. TÚNELES Y SEMITÚNELES

El paso de lugares escarpados constituyó un desafío al trazado de los canales de minería romana. La presencia en los terrenos paleozoicos de numerosos crestones de cuarcita supuso un importante inconveniente en el trazado de los canales (fig. 21). Debido a la dureza de este material, sólo en aquellos lugares en donde era inevitable, se registra la perforación de algunos túneles de corto recorrido para reducir la longitud de estos tramos de penosa excavación manual. Por las características de la cuarcita, el avance de la perforación se realizaba principalmente mediante el uso alternativo de fuego y agua para resquebrajar térmicamente la roca (fig. 22). Se aprecia en el interior de algunos túneles de trazado sinuoso que, de encontrar discontinuidades de menor dureza, no tenían inconveniente alguno sus constructores en seguirlas aún a costa de hacer fuertes quiebros en el trazado para acabar cuanto antes la perforación, no habiendo en la época otro modo más efectivo de hacerlo, ya que las herramientas de hierro por sí solas son claramente insuficientes para progresar sobre este material (figs. 23 y 24).



Fig. 21. Túnel de Peña Negra. Vertiente Norte del Teleno.

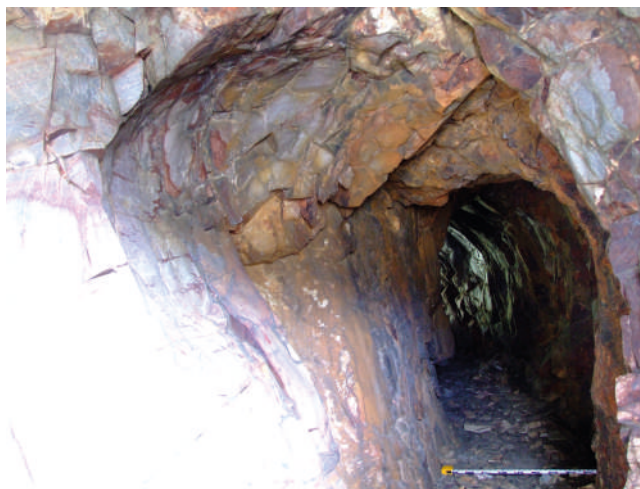


Fig. 22. Interior de un túnel excavado en cuarcita. Vertiente Norte del Teleno.

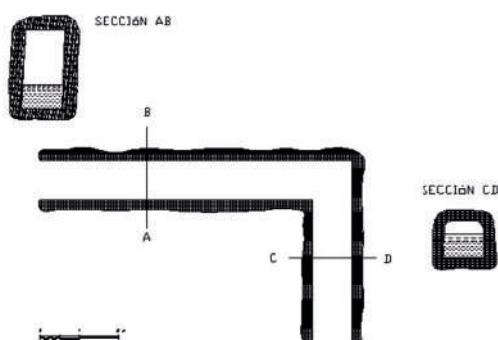


Fig. 23. Plano del túnel del canal TC-1.3. Canal C-1 en el Valle Lleiroso (Llamas de Cabrera-León).

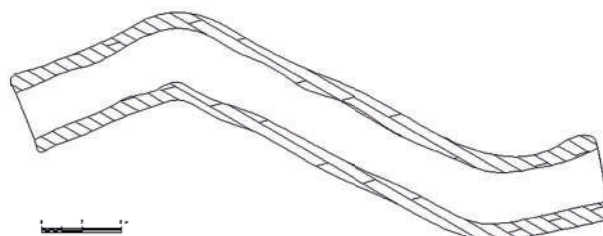


Fig. 24. Plano del túnel del canal TC-4. Canal C-4 en el Valle Lleiroso (Llamas de Cabrera-León).

En algunas condiciones se han perforado túneles para el paso de crestones rocosos de materiales más blandos (pizarras, areniscas, calizas, conglomerados, etc.) con objeto de reducir el esfuerzo de excavación y garantizar asimismo la estabilidad del canal.

Siguiendo con la misma tónica, se aprecia también el uso generalizado de semitúneles de diferentes dimensiones para evitar la sobreexcavación del terreno (fig. 25).

3.4.2. VARIACIONES DE LA PENDIENTE

En los canales de Las Médulas, los que más se han estudiado en detalle hasta la fecha, se han analizado algunas variaciones de la pendiente del trazado con el objetivo de evitar obstáculos significativos que

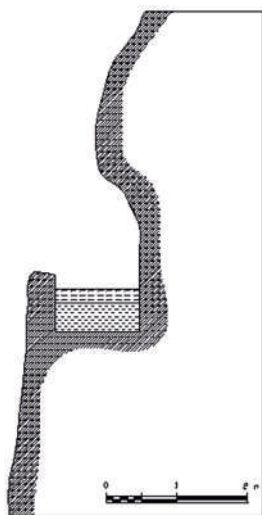


Fig. 25. Sección ideal de un semitúnel en un farallón rocoso.

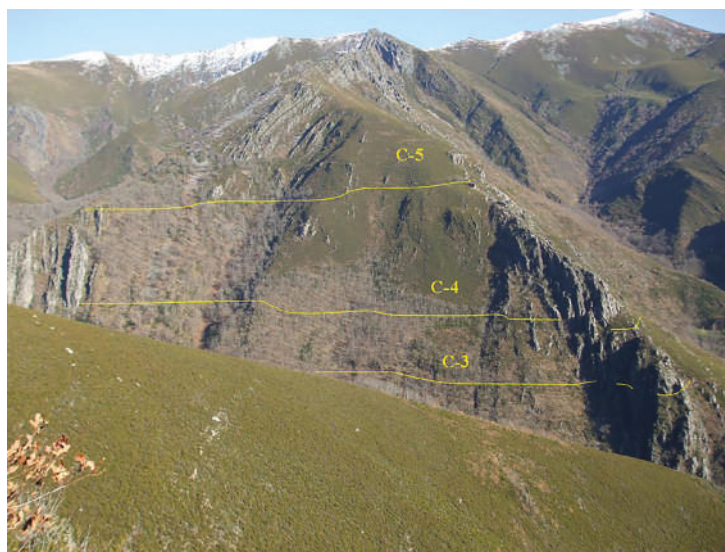


Fig. 26. Paso de los canales C-3, C-4 y C-5 de Las Médulas por un crestón de cuarcita en el Valle Lleiroso (Llamas de Cabrera, León).

dificultasen la construcción del canal o persiguiendo objetivos específicos. Los más interesantes son los siguientes:

- Canal CN-2 en el Valle del Silencio: se incrementa la pendiente para evitar la zona kárstica de la Cueva de San Genadio.
- Canal C-4 en Corporales: el paso del punto exacto del puerto de Peña Aguda para realizar el trasvase de las aguas del Eria y del Lago de Truchillas se consiguió incrementando la pendiente del canal a partir del cruce con el río Cabo.
- Canal C-5 en Llamas de Cabrera: la presencia de un imponente crestón de cuarcita donde fue necesario trazar diversos túneles para los canales C-3 y C-4 disuadió a los ingenieros romanos de continuar atravesando el crestón y elevaron la pendiente para sortearlo por encima (fig. 26).

3.4.3. CAMBIOS EN LA ANCHURA DE CAJA

En las primeras mediciones sólo se había apreciado un cambio de la anchura de caja dentro de un mismo canal (canal C-4 de Las Médulas en Corporales) de finalidad desconocida en ese momento. La progresión de las investigaciones ha proporcionado ya los motivos de esa circunstancia, tras el hallazgo de una prolongación de 43 km del canal C-4 hasta las inmediaciones del lago de Truchillas (Matías Rodríguez 2019). Condiciones semejantes tienen lugar en el canal C-3, que inicia su trazado

AGUA Y CANALES EN LA MINERÍA HIDRÁULICA ROMANA DEL ORO

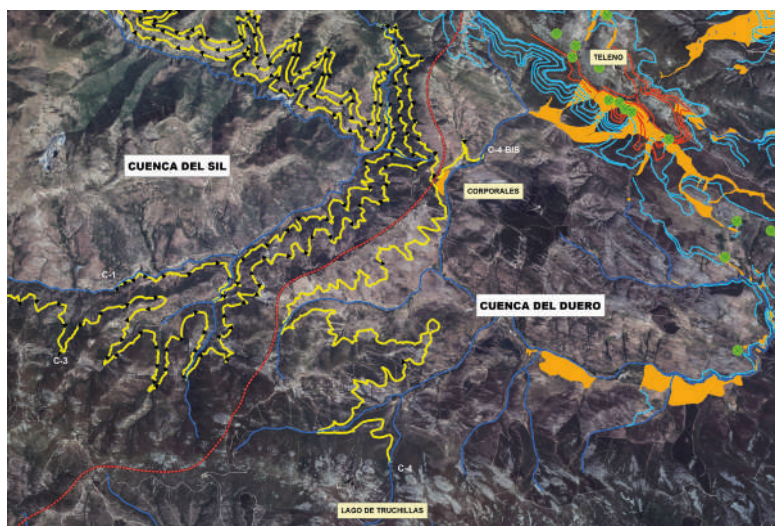


Fig. 27. Trasvases del canal C-4.

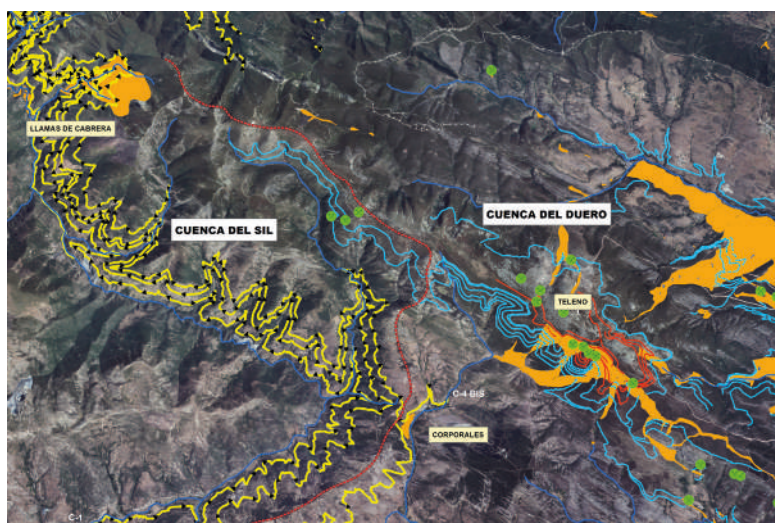


Fig. 28. Doble trasvase del nacimiento del río Cabo hacia el Teleno.

con apenas 0,90 m de anchura, y alcanza ya la medida habitual de 1,20 m tras recoger las aguas del río Cabo.

3.4.4. TRASVASES DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Se producen cuando las condiciones de abastecimiento de una cuenca llegan a su límite topográfico o, simplemente, es necesaria esa captación de agua específica por las condiciones del terreno, como la so-

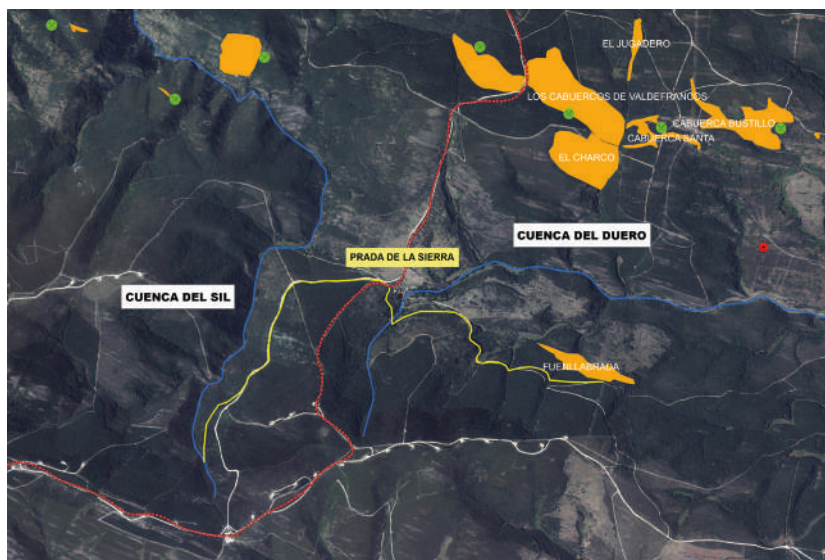


Fig. 29. Trasvase del río Meruelo hacia la mina de Fuenllabrada (Prada de la Sierra, León).

lución más sencilla. Al día de hoy se conoce en la Península Ibérica un único caso de trasvase de cuenca hidrográfica de época romana para uso doméstico-industrial (acueducto de Albarraçín a Cella. Moreno Gallo 2015). El resto de conducciones romanas conocidas de esta tipología está vinculado a la minería aurífera romana del entorno de la Sierra del Teleno, en número de 5:

- Trasvase Eria-Cabrera (canal C-4BIS de Las Médulas) (fig. 27).
- Trasvase Truchillas-Cabrera (canal C-4 de Las Médulas) (fig. 27).
- Doble Trasvase Río Cabo-Teleno (canales TS-4 y TS-5 de la vertiente sur del Teleno) (fig. 28).
- Trasvase Meruelo-Prada de la Sierra (canal de abastecimiento de la mina de Fuenllabrada) (fig. 29).

3.4.5. CANALES NIVALES

Cuando las minas de oro se sitúan a una altitud elevada, superior a los 1800 m, las condiciones hidrológicas cambian drásticamente por la meteorología y se impone un sistema de abastecimiento diferente que consiste en la captación de aguas de deshielo mediante depósitos de acumulación de nieve estratégicamente situados, aprovechando las condiciones del terreno. Cuando se produce el deshielo primaveral, el agua discurre por los canales hasta los depósitos de regulación-distribución. En ocasiones, los propios canales sirven también de elementos de captación del deshielo. Este hecho es especialmente patente en las minas del Teleno (Matías Rodríguez 2006a) y se ha constatado también en las del área Salientes-Villablino



Fig. 30. Depósitos de abastecimiento nival en el Teleno.



Fig. 31. Detalle de la acumulación de nieve en un depósito nival.

(Matías Rodríguez 2013). El denominador común es la ausencia, a partir de una cierta altitud, de cursos de agua estables, por lo que la única fuente de abastecimiento es la producida por el deshielo de las nieves acumuladas durante la estación invernal. La anchura de estos canales es sensiblemente inferior. Donde se han podido medir secciones, esta varía de 0,40 m a 0,60 m. Se da la circunstancia de que algunos de los más grandes depósitos de agua conocidos de la minería hidráulica romana, situados a 1900 m de altitud en la Sierra del Teleno, estaban alimentados por el agua de deshielo (figs. 30 y 31).

4. DEPÓSITOS DE REGULACIÓN - DISTRIBUCIÓN

Habitualmente el destino final de un canal romano de minería hidráulica es un estanque donde acumular el agua para obtener así una regulación controlada de la descarga. Los depósitos se emplazan directamente en la explotación o bien se encuentran en las inmediaciones para disponer de una reserva de agua que se dirige luego a otros depósitos (fig. 32). En el primer caso se puede dar la circunstancia de que el depósito puede llegar a ser total o parcialmente destruido por el avance de los trabajos mineros, lo que aporta datos significativos sobre la evolución de la mina. Los canales que comunican depósitos o vierten agua a los frentes de trabajo tienen ya unas dimensiones y técnicas constructivas muy diferentes y, sobre todo, no conservan la suave pendiente de los canales de alimentación, presentando por lo general valores muy superiores y variables.

Desde el siglo XIX algunos autores han llegado a interpretar en ocasiones estos depósitos como estanques de lavado donde se realizaba manualmente la separación del oro (Munárriz 1808):

(...) En la cima de todos estos montecillos se descubren aún señales de un depósito o balsa de agua más o menos grande al que van a parar una, dos o más acequias que se dirigen al río más cercano... A bastante trecho del pie de los mismos montes no se ven más que montones enormes de piedra gruesa con un canal o barranco en medio que va a desaguar siempre a algún río o arroyo, en el



Fig. 32. Depósito de regulación-distribución de La Fucarona (Rabanal del Camino, León).

que formaban balsas más pequeñas que en las de arriba. Los que removían el terreno separaban a brazo la piedra gruesa que el agua no podía arrastrar. Sobre la tierra ya removida dejaban caer con ímpetu el agua de las balsas que había en la altura. Las arenas menudas que esta dejaba en el curso las volvían a lavar en vasijas pequeñas en las balsas que había al pie de los montes, y de este modo reunían y recogían los granos y lentejuelas de oro mezclados con la tierra.

Igualmente, en los mismos términos se expresa este otro autor (Viadera 1850):

(...) la concentración se hacía en grandes charcas cuya forma, aunque variada por las vicisitudes del tiempo, se conoce era elíptica ó cuando menos se aproximaba a esa figura: algunas tienen un diámetro mayor de 400 varas y el menor de 40. Su profundidad no es conocida, pero puede suponerse que sería de 1 á 2 varas y probablemente tendrían una ligera inclinación hacia el punto de salida de los turbios. Este punto es un corte dado al circuito de la charca. Estas se hallan abiertas en el mismo aluvión, rara vez una sola, siempre son dos, lo más tres, colocadas unas debajo de otras. A medida que avanzaban la labor iban adelantando la colocación para evitar el transporte de las tierras... Colocada una capa de tierra darían entrada al agua para ponerla en suspensión, ayudando este trabajo con largas palas de hierro movidas á mano ó con un punto de apoyo á modo de palanca. El oro caía instantáneamente por la mayor gravedad y la tierra marchaba con el agua al lavadero inmediato donde en una segunda sedimentación serían recogidas las partículas de oro que hubiesen escapado á la primera; y si aún aquí se experimentase alguna pérdida un tercer lavadero la hacía desaparecer dejando únicamente en el desperdicio la tierra sola. Los cantos rodados y los detritus de esquisto se separarían a mano, si antes no lo hubiesen hecho por medio de cribas.

Esta interpretación errónea de los depósitos de regulación-distribución como “lavaderos” ha sido utilizada con frecuencia en algunos textos e interpretaciones (Soler 1883; Carro 1934).

5. LOS CANALES DE LAS MÉDULAS COMO EJEMPLO DE LA MAYOR RED HIDRÁULICA DE LA MINERÍA ROMANA

A lo largo de los tiempos ha destacado siempre entre todas las explotaciones de oro romanas la mina de Las Médulas, situada en el oeste de la provincia de León, entre las comarcas del Bierzo y La Cabrera. De hecho, una parte importante del escueto testimonio del naturalista y geógrafo Plinio sobre la minería de oro romana que se recoge en su *Historia Natural* (33.66-78) es una referencia clara sobre el modo de explotación minera de este yacimiento aurífero.

La espectacularidad y valor histórico de los restos de la mina romana de Las Médulas han merecido su catalogación por la UNESCO en diciembre de 1997 como bien cultural Patrimonio de La Humanidad. La capacidad demostrada por la tecnología minera romana para acometer a gran escala los trabajos de explotación de este gigantesco yacimiento aurífero constituye un importante hito en la historia de la minería mundial que presenta, aún al día de hoy, importantes cuestiones por esclarecer. El volumen de materiales removidos en la explotación de Las Médulas, del orden de varios cientos de millones de metros cúbicos, no llegó a ser superado hasta el siglo XIX tras la introducción de la maquinaria de vapor como fuerza motriz en el trabajo de las minas, con la salvedad de que los ingenieros romanos, dieciocho siglos antes, fueron ya capaces de realizar movimientos de tierras de gran envergadura sólo con la conjunción de la fuerza natural del agua, el conocimiento práctico y la organización adecuada para gestionar su utilización.

Para poder llevar a cabo la explotación del yacimiento aurífero de Las Médulas fue absolutamente necesaria la construcción de unos abastecimientos de agua que garantizaran el suministro adecuado para un correcto funcionamiento de los métodos de minería hidráulica aplicados por los ingenieros romanos. La posición notablemente elevada de estos depósitos rojos auríferos respecto a los cauces fluviales más próximos obligó a resolver el problema del suministro de agua mediante la planificación y construcción de una extensa red de canales cuya extensión, trazado y estructura había sido uno de los aspectos técnicos más desconocidos de Las Médulas hasta fechas muy recientes (fig. 33), en que ya ha sido realizada una precisa reconstrucción topográfica de la totalidad de esta red hidráulica (Matías Rodríguez, 2004; 2006; 2008a; 2008c; 2019).

La red de canales de abastecimiento de agua para la explotación de Las Médulas se encuentra emplazada en las vertientes norte y sur de los Montes Aquilianos, estribación montañosa que constituye la parte más occidental de la Sierra del Teleno, en cuyo extremo final hacia el oeste se encuentra el yacimiento de Las Médulas. El trazado de los canales se prolonga en dos casos hacia la vertiente norte de la Sierra de La Cabrera (Peña Trevinca), cerca ya del nacimiento del río Cabrera, con objeto de captar este río en el entorno de las localidades de La Baña y Encinedo. Se constata en todo momento la captación preferente y específica del caudal del río Cabrera (Cuenca del Sil), principalmente, a la que le siguen en importancia la del río

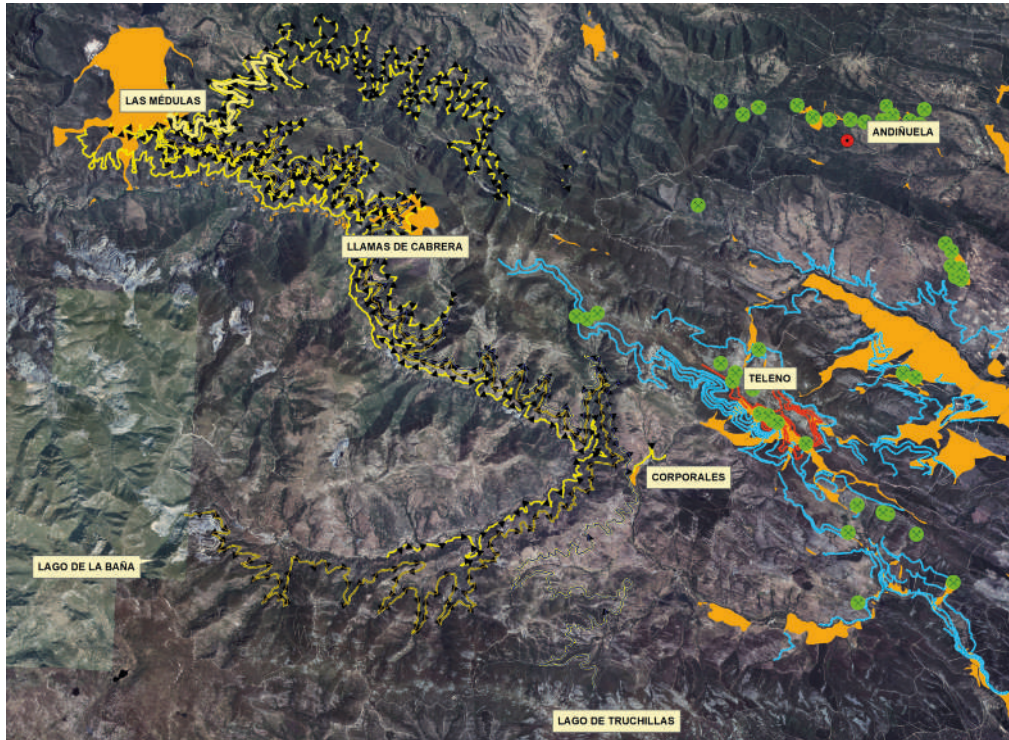


Fig. 33. Red de abastecimiento de Las Médulas.

Eria (Cuenca del Duero) y la captación del río Oza (Cuenca del Sil), esta ya correspondiente a la vertiente norte de los Montes Aquilianos, así como la de algunos arroyos de cierta importancia.

La red hidráulica construida por los ingenieros romanos para la explotación de Las Médulas presenta la siguiente estructura de abastecimiento y longitudes de trazado, referenciados en orden ascendente:

3 Canales en la vertiente norte de los montes Aquilianos (red septentrional)

- CN-1 71,7 Km (Captación: río Oza en Peñalba de Santiago)
- CN-1bis 19,3 Km (Captación: Arroyo de Ferradillo en Villavieja)
- CN-2 51,7 Km (Captación: río Oza en Peñalba de Santiago)

6 Canales en la vertiente sur de los montes Aquilianos (red meridional)

- C-0 45 km (Captación: río Cabrera en Odollo)
- C-1 95 km (Captación: río Cabrera en Encinedo)
- C-2 35 km (Captación: Arroyo Valdecorrales)
- C-3 143 km (Captación: río Cabrera en La Baña)
- C-3 a 10 km (Subsidiario del C-3 desde el Arroyo de Rozana)

- C-3 b 10 km (Subsidiario del C-3 desde el Arroyo de Rozana)
- C-4 123 km (Captación: río Eria en Corporales y Lago de Truchillas)
- C-5 41 km (Captación: Arroyo y de la Sierra en Odollo)

Trazado total: 650 km

Estas distancias de trazado han sido medidas sobre la reconstrucción topográfica de la red hidráulica de Las Médulas a escala 1:10.000 (base cartográfica: mapas ICONA 1983). Está en marcha una nueva medición más precisa sobre cartografía digital y MDT-Lidar que empieza a arrojar resultados sensiblemente superiores.

La red septentrional realizaba la captación del limitado caudal del río Oza en el entorno de Peñalba de Santiago mediante dos canales principales que intervinieron tanto en el comienzo de la explotación (CN-1), suministrando agua a la cota 810 m, como en la etapa final (CN-2), mediante el aporte a la cota máxima de abastecimiento (978 m). Se ha constatado ahora también la existencia de un tercer canal en la red septentrional denominado CN-1bis, de corto recorrido (19,3 km) que captaba las aguas del Arroyo de Ferradillo en Villavieja efectuando el suministro a la zona central del yacimiento a la cota 880 m (Matías Rodríguez 2008a).

La red de canales meridional resulta mucho más extensa y compleja, contando con 6 canales principales que abastecían a Las Médulas desde la cuenca del río Cabrera, teniendo tres de ellos (C-0, C-1 y C-3) su captación directamente en el propio cauce de este caudaloso río. Otro canal (C-4) realizaba un trasvase de cuencas, recogiendo las aguas del río Eria en la localidad de Corporales, de donde sale también un ramal recientemente descubierto de 43 km que llegaba hasta las inmediaciones del Lago de Truchillas para captar las aguas de su entorno (Matías Rodríguez 2019). Los dos restantes aprovechaban el agua de arroyos tributarios del río Cabrera en Llamas de Cabrera (C-2) y Odollo (C-5).

El canal más bajo encontrado en la red meridional (C-0) tenía su nacimiento en el río Cabrera (fig. 34), en la localidad de Odollo (Castrillo de Cabrera), participando en el comienzo de la explotación del yacimiento de Las Médulas, en su parte más baja. Se ha podido seguir su trazado hasta la localidad de Salas de La Ribera, donde se pierde en la acumulación de estériles del Barranco de la Balouta.

El canal C-1 capta también el río Cabrera por encima de la localidad de Encinedo de Cabrera en donde, excepcionalmente, se ha podido llegar a localizar el punto exacto de la captación en la margen derecha del río. Este canal tiene un trazado de casi 100 km, aportando agua al yacimiento en las primeras fases de la explotación, a cierta altura por encima de la actual localidad de Las Médulas (cota 780 m) (figs. 35/36).

El canal C-2 tiene su captación en el arroyo de Valdecorrales, en Llamas de Cabrera. Este hecho no se correspondía con el trazado habitual del resto de canales inferiores y superiores, que llegaban hasta el río Cabrera y el río Eria, por lo que en un primer momento se llegó a pensar que se podía considerar este canal como una obra incompleta que decidió ser paralizada por las urgentes necesidades de agua en la explotación de Las Médulas a unas cotas mucho más altas que las de los canales inferiores, la cual sería



Fig. 34. Canal C-0 en las inmediaciones de su captación (Odollo, León).



Fig. 35. Muros de sostenimiento del canal C-1 en la Virgen del Valle (Llamas de Cabrera, León).



Fig. 36. Entrada al túnel TC-1.1.1. Canal C-1 en la Virgen del Valle (Llamas de Cabrera, León).



Fig. 37. Vista de los canales de Las Médulas a su paso por la localidad de Pombriego (León). Es posible apreciar en el centro de la fotografía el canal C-3 y los dos subsidiarios que se sitúan a una cota inferior.

proporcionada a partir de ahora por los canales C-3, C-4, C-5, de la red meridional, y el CN-2, de la red septentrional. No obstante, la posible existencia de un paralelismo entre este canal y los canales C-5 y el CN-1bis, cuya función parece ser la de un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos más próximos al yacimiento cuando los canales principales llegasen al límite de su capacidad de suministro por encontrarse llenos, inclina ahora

a pensar que el C-2 tenía también una función de aporte suplementario para los terrenos explotados por los canales inferiores, en este caso el C-1. Su cota de trabajo en Las Médulas es de 840 m.

El canal C-3, con más de 143 km de trazado, es el más largo de los que abastecen a Las Médulas. Capta el río Cabrera por debajo del Lago de La Baña y mantiene durante todo su recorrido una pendiente uniforme y constante del 0,0021 (0,21%). A partir del Arroyo de Rozana (Pombriego) el canal C-3 presenta un desdoblamiento en otros dos canales más (C-3a y C-3b) que pudieron servir para ampliar las zonas de trabajo en la explotación, en donde tienen las siguientes cotas de llegada: 940, 910 y 885 m, respectivamente (fig. 35). La existencia del excepcional y extenso trazado del canal C-3 nos confirma de algún modo el dato que aporta Plinio en sus textos aludiendo a las cien millas romanas de distancia (147,8 km) para alguna de las conducciones de agua, dato que hasta ahora no había sido posible considerarlo como cierto en su verdadera magnitud, poniéndolo incluso en duda y recurriendo a sumas parciales de trazados para justificar su existencia (Sánchez-Palencia Ramos 1980, 220; Sánchez-Palencia Ramos y Pérez García 2000, 189; Domergue 1972-74, 510). Este hecho nos confirma plenamente, una vez más, la asombrosa fiabilidad de las fuentes de información de Plinio en cuanto a las redes hidráulicas de la minería aurífera romana.

Un cuarto canal (C-4) realizaba la captación del agua del río Eria (Cuenca del Duero) en las inmediaciones del actual Barrio de Pedrosa de Corporales, trasvasando el agua hacia la vertiente del río Cabrera (Cuenca del Sil), mediante la corrección intencionada del trazado del canal desde las proximidades del río Cabo, incrementando su pendiente la cantidad necesaria para hacerle pasar con exactitud por el punto topográfico más favorable del Puerto de Peña Aguda a la cota 1247 m, donde se aprecia todavía hoy su caja cortada por la actual carretera (fig. 38). Recientemente se ha encontrado una prolongación de este canal hasta las inmediaciones del Lago de Truchillas de 43 km de trazado, que constituye un nuevo trasvase de cuenca hidrográfica, y que dota a este canal de una longitud de 123 km. Confluye en Las Médulas con el canal CN-2 en Campo de Braña, a la cota más alta de abastecimiento del depósito de Campo de Braña (978 m).

El canal C-5, el más alto de la red meridional, efectuaba un aporte adicional de agua al depósito de Campo de Braña. Este canal utilizaba para su abastecimiento principal las aguas del Arroyo de la Sierra (Odollo). Su cota de llegada a Las Médulas es muy elevada respecto al punto de máximo abastecimiento (Campo de Braña, situado a 978 m), por lo que necesitó de la realización de varias bajantes para alcanzar la confluencia.

6. EL COMPLEJO DE MINERÍA AURÍFERA ROMANA DEL TELENO

La Sierra del Teleno se encuentra al este de Las Médulas y es la continuación de las estribaciones de los Montes Aquilianos. Alcanza su cota máxima en el Teleno con una altitud de 2185 m. El drenaje de esta imponente montaña se realiza por el río Duerna al norte y el río Eria al S. Toda la zona es aurífera y ya fue reconocida por los romanos en toda su extensión, realizando estos trabajos de minería hidráulica desde los márgenes de los ríos (depósitos aluviales) hasta la propia cumbre (depósitos eluviales y coluviales), con diversos trabajos en yacimientos primarios (Matías Rodríguez – González Nistal, 2014).



Fig. 38. Caja del canal C-4 en proceso de excavación arqueológica. Puerto de Peña Aguda (Corporales, León).

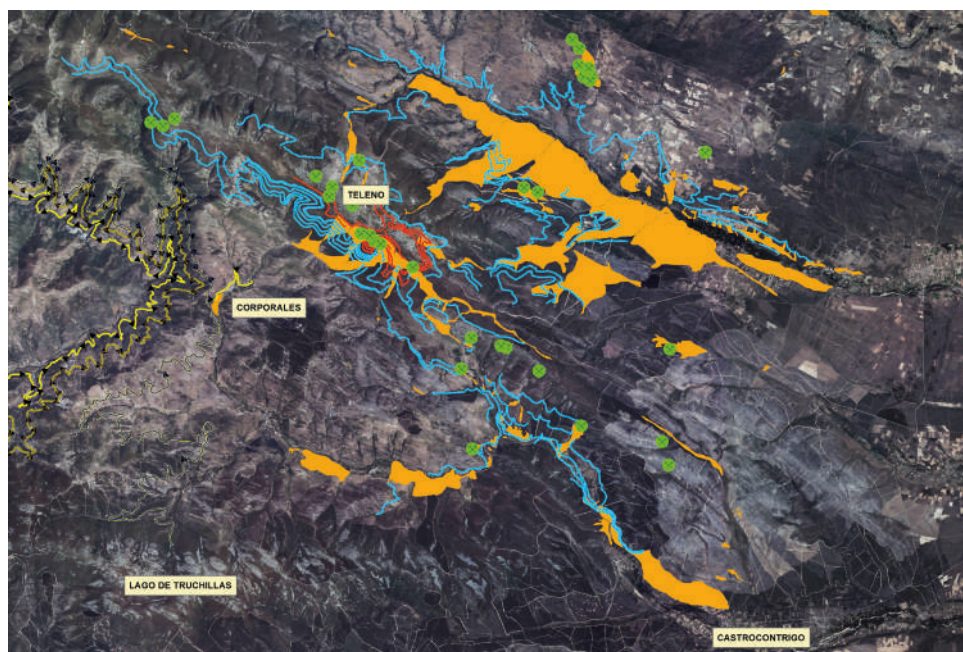


Fig. 39. Red hidráulica de las minas de oro romanas del Teleno. Azul: canales de abastecimiento fluvial. Rojo: canales de abastecimiento nival. Puntos verdes: minas en yacimientos primarios. Áreas de color naranja: minas en yacimientos secundarios.

El área ha sido intensamente investigada en los años 70-80 del siglo XX (Domergue 1971; 1971-72; 1975; 1986; 2008; 2012; Pérez García 1977; Domergue – Hérail 1978; Sánchez-Palencia Ramos 1980). Domergue ha calificado la red hidráulica de las minas de oro romanas del Teleno como la más compleja que se conoce (fig. 39).

El sistema hidráulico superior (por encima de la cota 1400) ha sido analizado hace unos años (Matías Rodríguez 2005; 2006a). Se han cartografiado más de 135 km de canales divididos en dos redes que se han distinguido por el tipo de abastecimiento: fluvial y nival. El inventario de depósitos ha superado la centena y fueron localizados dos nuevos trasvases de cuencas hidrográficas en la vertiente sur. Actualmente se encuentra en estudio el abastecimiento de los niveles inferiores donde predominan los sedimentos cenozoicos (Matías Rodríguez – Llamas Moya 2016; 2017). La característica principal de los depósitos inferiores del Teleno en su vertiente norte es la existencia de una explotación ininterrumpida a lo largo de 20 km del margen derecho del río Duerna sobre una superficie de 30 km². Se pueden clasificar los trabajos mineros romanos del Teleno como el mayor conjunto mundial de minería aurífera romana.

7. EL AGUA EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA

Desde el congreso celebrado en León en 1970, cuando el autor portugués Fernando de Almeida presentó el trabajo titulado *Mineração Romana em Portugal* (Almeida 1970), seguido posteriormente por Sán-

chez-Palencia Ramos (1983), se ha difundido con excesiva frecuencia y sin ningún tipo de rigor técnico la hipótesis de la utilización en la minería subterránea del agua procedente de sistemas de abastecimiento hidráulico para enfriar bruscamente la roca de cuarzo calentada mediante el fuego y provocar así su rotura. Ejemplos de esta incongruencia los podemos encontrar en la interpretación de diversos ámbitos de minería romana (Asturias, Tresminas, El Caurel, etc) especialmente relacionados con los trabajos de musealización, algunos muy recientes como el del Centro de Interpretación de Tresminas.

El procedimiento de calentar las rocas duras para facilitar su rotura (“caldas”) ya fue descrito por Agathárquides y recogido por Diodoro Sículo en el 50 a. C. en su descripción de las minas de oro del Egipto Ptolemaico:

En los confines de Egipto y también en el territorio adyacente de Arabia y Etiopía se encuentra una región que posee las más grandes minas de oro, de donde mucho oro es extraído a la superficie con gran sufrimiento y coste. Aunque la tierra es negra por naturaleza, contiene filones y venas de roca blanca distinguida por su brillo, que sobrepasa el de todas las rocas que por naturaleza brillan... Después de consumir la mayor parte de la dureza del filón aurífero con un gran fuego que lo hace friable, comienza el proceso de producción manual (...) (Diod. Sic. 3.12-13).

Plinio y Agrícola también reflejan en sus textos el uso del fuego como medio para el trabajo de los materiales más duros, compuestos esencialmente por cuarzo. Las cantidades de agua necesarias para este procedimiento son reducidas. Incluso, se habla en algunos textos de que no es estrictamente necesario, sino que el propio material se llega a resquebrajar por la escasa conductibilidad térmica del cuarzo y las impurezas e inclusiones que le acompañan (Craddock 1992; Weisgerber – Willies 2000; Hernández Ortiz 2004). Hasta la llegada de los explosivos y la perforación de barrenos, el sistema de las “caldas” era de uso habitual, hasta el punto de que las galerías se diseñaban con compartimentos específicos para facilitar la evacuación de los humos y vapores producidos.

Hasta épocas relativamente recientes no se han sentado las bases para ofrecer una explicación razonada a la coexistencia de trabajos mineros subterráneos y redes de abastecimiento hidráulico en algunas minas de oro romanas. El análisis de estas explotaciones muestra sistemáticamente dos fases de trabajo en las que se utiliza en la primera fase un sistema hidráulico para explotar los depósitos superficiales (coluviones y eluviones). Después de esta fase, cuando ha quedado al descubierto el yacimiento primario original y el agua ya no es capaz de profundizar en el terreno, se procede al trabajo directo sobre los filones en una segunda fase que se inicia a cielo abierto, pasando luego a subterránea, si la mineralización es interesante por su riqueza (Matías Rodríguez 2011).

8. CONCLUSIONES

Los estudios realizados hasta la fecha sobre las redes de abastecimiento de agua para la minería hidráulica romana muestran un elevado nivel de planificación de la explotación de los recursos hídricos de extensas zonas geográficas. La irregular orografía, relieves escarpados y, en algunos casos, la elevada altitud, no

fueron obstáculos para que los ingenieros romanos trazasen los canales de abastecimiento necesarios para la explotación de los diferentes depósitos auríferos.

El análisis en detalle de estos canales sorprende con diversos datos constructivos que sólo pudieron llevarse a cabo mediante técnicas topográficas ciertamente avanzadas, a la vez que las soluciones prácticas aplicadas fueron contundentes ante la adversidad del territorio, donde el objetivo era llevar el agua a cualquier precio.

El conocimiento preciso de la red de abastecimiento de una mina hidráulica ha de ser necesariamente el punto de partida para su interpretación.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, F. de (1970). “Mineração romana em Portugal”, en: *La Minería Hispana e iberoamericana. Contribución a su investigación histórica. Estudios - Fuentes - Bibliografía*, León, 195-220.
- Carro y Carro, J. (1934). *En la Enigmática Maragatería. Memoria de las excavaciones realizadas en 1933*, Madrid: Imprenta de Juan Pueyo.
- Craddock, P. T. (1992). “A Short History of Firesetting”, *Endeavour* 16, 145-150.
- Domergue, C. (1971). “Las minas de oro romanas de la provincia de León: razones de una excavación arqueológica”, *Tierras de León* 14, 39-51.
- Domergue, C. (1972-74). “A propos de Pline et pour illustrer sa description des mines d’or romaines d’Espagne”, *Archivo Español de Arqueología* 45-47, 499-548.
- Domergue, C. (1975). “Excavaciones en las minas de oro romanas de la provincia de León: campañas 1971-1973”, *Actas del XIII Congreso Nacional de Arqueología*, Zaragoza, 847-854.
- Domergue, C. (1986). “Dix-huit ans de recherche (1968-1986) dans les mines d’or romaines du nord-ouest de la Péninsule Ibérique”, en: *Actas del I Congreso Internacional Astorga Romana*, v. II, 7-101.
- Domergue, C. (2008). *Les mines antiques. La production des métaux aux époques grecque et romaine*, Paris.
- Domergue, C. (2012). “Les exploitations hydrauliques romaines dans les dépôts alluviaux aurifères du Nord-Ouest de l’Espagne: Las Médulas et le Teleno (Province de León). À propos de publications récentes”, en: J.-P. Bost (dir.), *L’eau: usages, risques et représentations dans le Sud-Ouest de la Gaule et le Nord de Péninsule Ibérique, de la fin de l’âge du Fer à l’Antiquité tardive (II^e s.a.C-VI^e s.p.C.)*, Bordeaux, 111-140.

- Domergue, C. – Hérail, G. (1978). *Mines d'or romaines d'Espagne: le district de la Valduerna (province de león). Étude geomorphologique et arqueologique*, Toulouse.
- Forchheimer, P. (1935). *Tratado de Hidráulica*, Buenos Aires.
- Hernández Ortiz, F. (2004). "Firesetting: breaking rock with fire at Konsberg, Norway", *De Re Metallica* 3, 43-47.
- King, H.W. – Brater, E.F. (1962). *Manual de Hidráulica*, México.
- Liria Montañés, J. (2001), *Canales hidráulicos: proyecto, construcción, gestión y modernización*, Madrid.
- Longridge, C. C. (1910). *Hydraulic Mining*, London.
- López Andrés, L. (1997). *Manual de Hidráulica*, Alicante.
- Matías Rodríguez, R. (2004). "Ingeniería minera romana: La red hidráulica de Las Médulas", en: O. Puche Riart – M. Ayarzagüena Sanz (coord.), *Actas del II Simposio de Minería y Metalurgia Antiguas del Sudoeste Europeo (Madrid, 24-27 de junio de 2004)*, Almadén, 279-294.
- Matías Rodríguez, R. (2005). "La minería aurífera romana en la Sierra del Teleno (León-España): nuevos datos sobre su ingeniería y gestión", en: *Actas del III Simposio sobre Minería y Metalurgia antiguas del Sudoeste Europeo (Porto, 23-25 de junio de 2005)*, Almadén, 211-229.
- Matías Rodríguez, R. (2006). "La Red Hidráulica de Las Médulas: trazado e ingeniería", *Revista del Instituto de Estudios Bercianos* 30-31, 5-85.
- Matías Rodríguez, R. (2006a). "La Minería Aurífera Romana del Noroeste de Hispania: Ingeniería minera y gestión de las explotaciones auríferas romanas en la Sierra del Teleno", en: *Nuevos Elementos de Ingeniería Romana. Actas del III Congreso de las Obras Públicas Romanas (Astorga-León, octubre de 2006)*, Salamanca, 213-263.
- Matías Rodríguez, R. (2006b). *Las Médulas: ingeniería minera romana*, León.
- Matías Rodríguez, R. (2008). "El complejo de minería aurífera romana de Llamas de Cabrera (León)". *Revista del Instituto de Estudios Bercianos*, n° 32-33, junio 2008. Peñalba Impresión, Ponferrada-León, 17-52.
- Matías Rodríguez, R. (2008a): "La red hidráulica de Las Médulas: una excepcional obra de la ingeniería romana", *Actas del Homenaje a Las Médulas de la Real Academia Española de la Ingeniería* (en prensa).

- Matías Rodríguez, R. (2008c). “El agua en la ingeniería de la explotación minera de Las Médulas (León-España)”, *Lancia* 7, 17-112.
- Matías Rodríguez, R. (2011). “Los yacimientos auríferos primarios de la provincia de León (España): técnicas de explotación romana”, en: C. M. Braz Martins *et al.* (coord.), *Povoamento e Exploração dos Recursos Mineiros na Europa Atlântica Occidental*, Braga, 155-178.
- Matías Rodríguez, R. (2012). “Nuevos datos para el conocimiento de las minas de oro romanas del Alto Carrión”, *Colección de Historia Montaña Palentina* 6, 15-49.
- Matías Rodríguez, R. (2013). “Minería aurífera romana en el área Salientes-Villablino (León-España)”, en: *Actas del XIV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero (Concejo de Castrillón-Asurias)*, 631-648.
- Matías Rodríguez, R. (2019). “Cartografía de un nuevo tramo de 43 km del canal C-4 de la mina de oro romana de Las Médulas (León-España)”, en: L. Mansilla Plaza – J. M. Mata Perelló, *Actas del XVII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero (Almadén, 2017)*, Madrid, 327-340.
- Matías Rodríguez, R. – González-Nistal, S. (2014). “Delimitación de un nuevo y extenso yacimiento aurífero primario en la sierra del teleno (león-españa) siguiendo las evidencias de minería romana”, en: *Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero*, Logrosán, 519-542.
- Matías Rodríguez, R. – Llamas Moya, B. (2017). “Use of LIDAR and photointerpretation to map the water supply at the LMas Murias-LosTallares Roman gold mine (Castrocontrigo, León, Spain)”, *Archaeological Prospection* 2018-25, 59–69.
- Matías Rodríguez, R. – Llamas Moya, B. (2022). “Roman Gold Mining at “Las Miédolas” (Las Omañas-León. Spain): LIDAR and photointerpretation in the analysis of ‘peines’ system”, *Geoheritage* 13.2. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00674-z>
- Matías Rodríguez, R. *et al.* (2014). “Evidencias de minería hidráulica romana en la Sierra de Pías (Valongo-Portugal)”, en: *Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero*, Logrosán, 481-498.
- Moreno Gallo, I. (2004). “Topografía Romana”, en: R. Alba *et al.* (coord.), *Elementos de Ingeniería Romana. Actas del II Congreso Europeo Las Obras Públicas Romanas (Tarragona, 3-6 noviembre de 2004)*, Madrid, 157-189.
- Moreno Gallo, I. (2015). “Análisis técnico y constructivo del acueducto romano de Albarracín a Cella”, en: *Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana. Actas del V Congreso Europeo de las Obras Públicas Romanas*, Madrid, 225-248.

- Munárriz, J. M. (1808). Apuntaciones para la historia natural y política del Bierzo y descripción de la Merindad de La Somoza en el Reino de León, en: S. Gómez Núñez (1926), *El general de artillería Don Juan Manuel Munárriz y la siderurgia del siglo XVIII en la región del Bierzo*, Madrid.
- Pérez García, L.C. (1977). *Los sedimentos auríferos del NO de la Cuenca del Duero (provincia de León-España) y su prospección*, [Tesis Doctoral Universidad de Oviedo]. Repositorio institucional – Universidad de Oviedo.
- Pérez García, L. C. (2001). “La mina de oro romana de Las Médulas”, en: *Patrimonio geológico de Castilla y León*, Madrid, 30-55.
- Pérez González, M. - Matías Rodríguez, R. (2008). “Plinio y la minería aurífera romana: nueva traducción e interpretación de Plin. *Nat.* 33.66-78”. *Cuadernos de Filología Clásica. Estudios Latinos* 28.1, 43-58.
- Pérez González, M. L. – Matías Rodríguez, R. (2013). “Yacimientos primarios de oro en Omañas (León-España): minas y canales en el Valle Gordo”, en: *Actas del XIV Congreso sobre Patrimonio Geológico y Minero (Concejo de Castrillón, Asturias)*, 583-602.
- Sánchez-Palencia Ramos, F. J. (1980). “Prospecciones en las explotaciones auríferas del N.O. de España (Cuencas de los ríos Eria y Cabrera y Sierra del Teleno)”, *Noticiario Arqueológico Hispánico* 8, 214-289.
- Sánchez-Palencia Ramos, F. J. – Pérez García, L. C. (2000). “La infraestructura hidráulica: canales y depósitos”, en: F. J. Sánchez-Palencia Ramos (ed.), *Las Médulas (León). Un paisaje cultural en la ‘Asturia Augustana’*, León, 189-207.
- Sánchez-Palencia Ramos, F. J. – Sastre Prats, I. (2002). “La red hidráulica en las minas romanas de oro del noroeste hispano”, en: *ARTIFEX Ingeniería Romana en España. Catálogo de la exposición*, Madrid, 251-254.
- Soler, J.M. (1883). *Reseña geológico-minera de la provincia de León y catálogo de minerales, rocas, fósiles, antigüedades, productos metalúrgicos, cerámica y aguas*, León: Imprenta de la Diputación Provincial.
- Viadera, F. J. (1850). “Memoria sobre los terrenos auríferos de la provincia de León, situados en el partido judicial de Astorga y valle conocido con el nombre de Maragatería, pertenecientes a la Sociedad Maragata Leonesa”, *Revista Minera* 1, 385-395.
- Weisgerber, G. – Willies, L. (2000). “The use of fire in prehistoric and ancient mining-firesetting”, *Paléorient* 26.2, 131-149.

INGENIERÍA HIDRÁULICA ROMANA.

VI CONGRESO INTERNACIONAL DE LAS OBRAS PÚBLICAS ROMANAS

SANTO DOMINGO DE LA
CALZADA 7, 8 Y 9 DE
NOVIEMBRE DE 2019

ISAAC MORENO GALLO
(COORD.)

21 HISTORIA ARQUEOLOGÍA

INGENIERÍA HIDRÁULICA ROMANA.
VI CONGRESO INTERNACIONAL DE LAS
OBRAS PÚBLICAS ROMANAS

ISAAC MORENO GALLO (COORD.)

INGENIERÍA HIDRÁULICA ROMANA. VI CONGRESO INTERNACIONAL DE LAS OBRAS PÚBLICAS ROMANAS

Santo Domingo de la Calzada 7, 8 y 9 de noviembre de 2019

Congreso Internacional de las Obras Públicas Romanas (6º. 2019. Santo Domingo de La Calzada)

Ingeniería hidráulica romana: VI Congreso Internacional de las Obras Públicas Romanas: (Santo Domingo de la Calzada 7, 8 y 9 de noviembre de 2019) / coordinador Isaac Moreno Gallo. -- Logroño: Instituto de Estudios Riojanos, 2023.

308 p.: il.col; 28 cm. - (Historia Arqueología; 21).

D.L. LR 696-2023. - ISBN 978-84-9960-170-0

1. Obras públicas-España-Hasta S.V - Congresos y Asambleas. 2. España-Restos arqueológicos romanos-Congresos y asambleas. I. Moreno Gallo, Isaac. II. Instituto de Estudios Riojanos. III. Serie.

624(460)"/04"(063)

904(460):7.032(37)(063)

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito de los titulares del copyright.

Primera edición: julio, 2023

© Isaac Moreno Gallo (Coord.)

© Instituto de Estudios Riojanos, 2023

C/ Portales, 2

26001 Logroño, La Rioja

www.larioja.org/ier

© Imagen de cubierta: *Torres de descarga de presión en los cambios de alineación del acueducto romano de Aspendos (Turquía)*. Fotografía de Isaac Moreno Gallo.

Depósito Legal: LR 696-2023

ISBN: 978-84-9960-170-0

© Realización técnica: Grupo Editorial Sargantana

Impreso en España. Printed in Spain.

Índice

- 9 **Prólogo**
Concha Andreu Rodríguez
Presidenta de la Comunidad Autónoma de La Rioja
- 13 **Abastecimientos de aguas romanos. Paradigmas y realidades**
Isaac Moreno Gallo
- 67 **Inverted syphons and roman hydraulic technology**
H. Paul M. Kessener
- 105 **Agua y canales en la minería hidráulica romana del oro**
Roberto Matías Rodríguez
- 143 **Archaeological information obtained from carbonate deposits in ancient water systems**
Cees Passchier - Gül Sürmelibindi
- 169 **Descubrimiento y análisis de dos nuevas conducciones en el entorno de Mérida: avances y resultados**
Santiago Feijoo Martínez – Diego Gaspar Rodríguez
- 189 **Regulación de caudales en los abastecimientos de agua romanos**
José Manuel de la Peña Olivas

- 219 **La ingeniería hidráulica en los tiempos preclásicos**
Manuel Durán Fuentes
- 239 **El agua en los puertos romanos**
José Manuel de la Peña Olivas
- 255 **Ingeniería hidráulica de la ciudad de *Valeria* (Cuenca): la cuestión del ninfeo**
Jesús Sánchez Sánchez
- 287 **Dos acueductos romanos inéditos: *Norba Caesarina* (Cáceres) y *Regina Turdulorum* (Casas de Reina)**
Juan Gil Montes – José Vargas Calderón

El VI Congreso Internacional de Ingeniería Romana organizado por el Colegio de Ingenieros Civiles y celebrado en Santo Domingo de la Calzada en noviembre de 2019, supuso un nuevo hito en la investigación de la ingeniería antigua. En esta monografía se ponen de relieve nuevos aspectos sobre el abastecimiento de aguas y la ingeniería sanitaria en el mundo romano.

Roma fue una cultura donde el agua garantizaba la *salubritas* y *securitas* de las ciudades y convertía a sus territorios en paisajes irrigados. Las estructuras hidráulicas que desempeñaban esta función, sobre todo los acueductos, eran vistas como el símbolo de la grandeza de Roma, de su obra civilizadora. Estrabón los consideraba, junto con las calles y las cloacas, las obras públicas más extraordinarias de una ciudad (Str. 5.3.8); Frontino, por su parte, dice que son más útiles que las pirámides de Egipto o las famosas construcciones griegas (Aq. 16). Pero, como se puede leer en estas páginas, los acueductos no son solo las admiradas arquerías de que en ocasiones disponían, aunque realmente son casi las únicas estructuras que el imaginario colectivo ha asociado a este valiosísimo legado romano. El abastecimiento de agua quedó garantizado por tuberías de diversas naturalezas, galerías subterráneas que conducían el agua por el subsuelo, o canales de fábrica cubiertos que, aunque no son perceptibles a simple vista, sí que formaron parte entre todos, junto con las arquerías, de esas grandes obras de abastecimiento de agua potable que dotaron de salud, bienestar y seguridad a aquella civilización por todo el *Orbe* entonces conocido.

