

Material y cronología de las *rotae* del Museo de Huelva

Eduardo Rodríguez Trobajo, Centro de Investigación Forestal. INIA.

Se estudian los restos de ruedas de drenaje encontrados en las minas de Riotinto que se conservan en el Museo de Huelva. En la construcción de estas *rotae* se utilizaron varias especies de pino, abeto y roble en función de la solicitud mecánica de cada pieza. Se ha verificado la integridad original del material, detectándose sólo pequeñas alteraciones en el montaje.

Mediante la dendrocronología se ha podido conocer el proceso constructivo y se han establecido las relaciones cronológicas del material. La aplicación conjunta del carbono-14 y la dendrocronología mediante la técnica de los "wiggle matching" ha permitido la datación *post quem* de la *rota* en 100-210 cal AD y de las piezas sueltas en 114-169 cal AD.

No se han encontrado diferencias tipológicas entre este material y las otras *rotae* halladas en Riotinto, Tharsis y São Domingos que pudieran tener un significado cronológico. A partir de la similitud tipológica y la presencia de especies de maderas autóctonas y alóctonas, se discuten diferentes hipótesis acerca de la contemporaneidad de las *rotae* y la ubicación de los talleres donde se construyeron.

***Rotae* material and chronology at the Huelva Museum**

A study was performed of the remains of drainage wheels found in the Rio Tinto Mines and currently conserved at the Huelva Museum. Various species of pine, fir and oak were used to build these *rotae* (wheels) according to the mechanical requirements of each piece. The original integrity of the material has been verified and only small alterations have been detected in their assembly.

Dendrochronological studies were carried out to determine the building process and the chronological relationships of the materials have been established. The combined application of Carbon-14 tests and dendrochronological studies, by means of the "wiggle matching" technique, have enabled *post quem* dating of the *rota* (wheel) to 100-210 AD and of the loose pieces to 114-169 AD.

No typological differences of potential chronological significance were observed between this material and the other *rotae* (wheels) found in Rio Tinto, Tharsis and S. Domingos. Based on the typological similarity and the presence of autochthonous and allochthonous tree species, different hypotheses are being considered on the coethnicity of the *rotae* (wheels) and the location of the workshops where they were built.

Introducción

Los hallazgos de ruedas de desagüe

La vuelta a la actividad de las explotaciones mineras del SO peninsular en la segunda mitad del siglo XIX provocó el afloramiento de labores antiguas, entre cuyos restos aparecieron diferentes ingenios utilizados para drenar el agua que se acumulaba en pozos y galerías. Vitrubio, en *De architectura* (libro X, capítulos 4-7), describe de manera sistemática estas máquinas (*rotae, cochleae, Ctesibica machinae*), por lo que se trata de soluciones técnicas bien conocidas a finales del siglo I a.C. Entre los montajes más espectaculares, se descubrió en las minas de Tharsis (GONZALO Y TARÍN, 1888) un conjunto de 14 pares de ruedas o *rotae* que dispuestas en cadena bombeaban el agua desde 40 m de profundidad.

Por consiguiente, se ha llegado a encontrar un elevado número de *rotae* en diferentes explotaciones de la cuenca, pero el mal estado en que se hallaban explica que se perdiera la mayoría, y actualmente sólo nos consta la existencia de 4 ruedas incompletas y algunas piezas más. Por ello, los datos aportados por autores como Gonzalo y Tarín, Palmer, Stevenson, etc., que fueron testigos directos de los hallazgos, son esenciales para nuestro estudio, si bien en ocasiones adolecen de cierto rigor, a lo que se añaden los errores acumulados en datos y dibujos de la bibliografía posterior. En el capítulo I de este libro, Ojeda Calvo hace una revisión detallada de estos hallazgos y sus problemas de identificación, por lo que nos apoyaremos en sus resultados para nuestro estudio cronológico.

En las minas de Riotinto se concentra el mayor número de hallazgos que Luzón (1970) cifra en más de 40 ruedas hasta 1932. En la actualidad sólo se conservan una rueda de 25 radios casi completa y 3 fragmentos de ruedas de 27 radios (todos ellos en el Museo de Huelva); y un fragmento de casi un tercio de rueda de 27 radios en el British Museum de Londres. Por otra parte, conocemos la localización de tres hallazgos que se producen en momentos distintos: Filón Norte (1886), Filón Sur (1919-1921) y Masa Planes (1928), si bien no disponemos de una relación segura entre los restos indicados y su localización. Así, el fragmento del British Museum, registrado en 1889 (WEISGERBER, 1979), concuerda con la referencia que hace Gonzalo y Tarín (1888) del hallazgo de un par de ruedas en junio de 1886 en el criadero del Balcón del Moro (Filón Norte). Sin embargo, no coinci-

de su número de radios (27) con las ruedas halladas (22) que fueron reproducidas en un grabado y un plano (capítulo I, figuras 7 y 8). Por consiguiente, es posible que la rueda del British Museum fuese encontrada en 1886, pero no podemos tomar con plena seguridad su localización.

Por el contrario, es fácil apreciar la estrecha similitud entre la *rota* casi completa del Museo de Huelva y un plano de una rueda de 25 radios encontrada en Masa Planes en 1928, que se encuentra en la Cartoteca de la Fundación Riotinto (capítulo I, figura 16). Asimismo, en la foto más antigua que se conoce de esta rueda (capítulo I, figura 19) fue anotada su procedencia del filón Masa Planes. Tal como concluye Ojeda Calvo, a favor de esta adscripción cuenta también el hecho de no ser citada por Palmer en 1927. Si bien no tenemos certeza absoluta sobre esta procedencia, tampoco hay noticias de hallazgos de ruedas de 25 radios en otras localizaciones.

Finalmente, las 3 piezas sueltas del Museo de Huelva (capítulo I, figura 10) no han sido objeto de tanta atención sobre las circunstancias de su descubrimiento. Estas piezas son “medio-discos” de rueda: dos bien conservadas (138 y 491, nº inventario: 6584 y 5491-A) y una bastante fracturada (nº inventario: 5491-1). Únicamente podemos destacar que tienen 27 radios como la rueda del British Museum, pero esto no prueba la misma procedencia, como pretende Weisgerber (1979), pues está documentado el uso de ruedas similares en diferentes lugares.

Hay que subrayar que no nos consta la pervivencia de ninguna *rota* hallada entre 1919 y 1921, pese a que debió producirse una gran acumulación de ruedas a tenor de las descripciones de Palmer (1927). Así se descubrió en el Filón Sur una cadena de 8 parejas de ruedas de 30 radios que elevaban el agua a más de 30 m (capítulo I, figura 14). Palmer aporta también la reproducción a tamaño natural de una rueda de 24 radios, pero hay ambigüedad en su descripción, como también sucede con dos fotos que incluye sobre un mismo hallazgo, en las que se distinguen varias ruedas de 24 radios (capítulo I, figuras 12 y 13). Mantenemos cierta reserva sobre si estas ruedas fueron halladas realmente en un mismo momento y lugar y, por otra parte, sobre si alguno de los restos conservados pueda proceder de otras zonas desconocidas. Podemos afirmar, por tanto, que los datos que disponemos sobre los hallazgos en Riotinto aconsejan cierta cautela a la hora de asociar la

cronología de cada resto a zonas de explotación antiguas, así como para presuponer relaciones de contemporaneidad entre los mismos.

Las otras *rotae* que se conservan fueron halladas en labores antiguas de las minas de Tharsis (Huelva) y São Domingos (Alentejo, Portugal) formando parte también de grupos escalonados de ruedas. En el Museum of Transport de Glasgow se encuentra 1/3 de *rota* de 27 radios que debió pertenecer al par de ruedas que se recuperó en el Filón Norte de Tharsis en 1867, según ha descrito Gonzalo y Tarín (1888); y en el Musée des arts et métiers de París se conserva casi ¼ de una *rota* de 27 radios enviada desde São Domingos por el ingeniero Deligny en 1864. Otros restos de ruedas similares, que no han llegado a conservarse, se hallaron en explotaciones de menor importancia, como las minas de El Lagunazo, cercanas a Tharsis (GONZALO Y TARÍN, 1888), o la mina de San Cristóbal en Calañas (LUZÓN, 1975). Por tanto, podemos concluir que el sistema de drenaje mediante cadenas de *rotae* llegó a ser una técnica consolidada que se generalizó en toda la cuenca minera.

Los indicadores cronológicos

A la vista de lo anterior, la aproximación cronológica al material parte de un déficit de información contextual de los escasos y dispersos restos conservados. Las primeras dataciones carbono-14 conocidas que se relacionan con los restos se realizaron hace ya varias décadas:

1. Muestra extraída de la rueda del British Museum, que fue medida por el propio museo y dio el resultado: 2400 \pm 150 BP (Radiocarbon, 1961, 3, p.43), cuya edad calibrada es 850 BC–100 BC (95,4%).
2. Carbón de encina procedente de un cúmulo de escorias de Riotinto, medida por el National Physical Laboratory de Londres: 1810 \pm 95 BP (BLANCO Y LUZÓN, 1966); edad calibrada: AD–430 AD (95,4%).

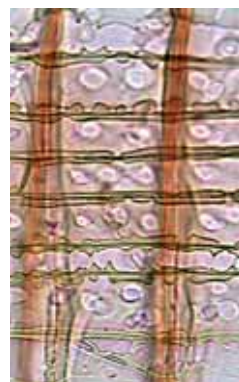
La medición de la rueda del British Museum tiene especial interés pues es la primera datación *post quem* directa de las ruedas, si bien su falta de ubicación en una secuencia de anillos y la baja precisión no nos permiten tomarla como una aproximación cronológica.

Es notoria, por otra parte, la escasez de fuentes escritas que hagan referencia a la actividad minera en el Suroeste peninsular, en contraste con las extensas descripciones de las explotaciones del Sudeste (BLANCO Y

LUZÓN, 1966). Por ello la información cronológica se ha basado en otros indicadores cronológicos como el numismático y cerámico, tipología de lucernas, inscripciones y otros artefactos encontrados en las propias galerías (DOMERGUE, 1987). En el capítulo I de este libro, se estudian las fluctuaciones históricas de la actividad minera en la cuenca SO, cuya dinámica puede resumirse en un periodo de máxima actividad, iniciado en el último cuarto del siglo I d.C., que tiene su mayor auge durante la dinastía de los Antoninos y declina a partir de Antonino Pio. Se constata un periodo de abandono general en el siglo III d.C., al que sigue cierta recuperación de la actividad en algunas explotaciones como las de Riotinto ya en el siglo IV d.C., que se mantiene hasta el siglo V d.C., época en la que se produce el abandono que durará hasta el siglo XVIII (PÉREZ MACÍAS, 1998). Podemos considerar, por tanto, que el sistema de las *rotae* se circunscribe *a grosso modo* a los siglos II–V d.C, si bien para algunas explotaciones de la cuenca deba reducirse al siglo II d.C.

Si nos centramos en la constitución material de las *rotae*, debemos destacar la manifiesta unidad tipológica de todas las ruedas documentadas: un cubo (*rotae modiol*) doble, radios pareados y un anillo continuo de cangilones de sección trapezoidal (*modioli quadrati*), que están provistos de aberturas en ambos lados. Otra peculiaridad constructiva es el uso exclusivo de clavijas de madera capaces de resistir el carácter corrosivo del medio. Por el contrario, se constatan diferencias tipológicas netas con los ingenios de desagüe hallados en otras minas de oro o plata de época romana. Así, los restos de ruedas de las minas de Rosia Montana y Ruda Barza (Dacia, Rumanía) tienen un diseño diferente: cubo compacto y radios únicos, no pareados (WEISGERBER, 1979); y la tabla de una *rota* hallada en las minas de Ogofau (Dolaucothi, Gales) se parece más al tipo dacio que al hispano (BOON Y WILLIAMS, 1966). La cronología de los restos romanos tiene como *terminus post quem* la conquista romana de Dacia en 106 d.C., y la pieza de Dolaucothi ha sido datada por carbono-14 en 90 \pm 70 a. C. *post quem* (BURNHAM, 1997).

En nuestra aproximación cronotipológica nos basaremos en los estudios de Weisgerber (1979) de la rueda de Riotinto del British Museum, en Domergue *et al.* (1999) para la rueda de São Domingos, y en Domergue y Bordes (2004) para la rueda de Tharsis. La observación detenida de las *rotae* nos revela un diseño depurado que tuvo que ser alcanzado tras un tiempo de perfeccionamiento



1. Arriba: sección transversal y tangencial de *Quercus* sp. Abajo: sección transversal y vaso de *Fraxinus angustifolia* Vahl. Clavijas de la *rota* restaurada. Imagen: M. T. López de Roma

2. *Pinus pinaster* Sol in Aitor. Arriba: secciones transversal y tangencial. Abajo: sección radial con el campo de cruce. Disco de la *rota* restaurada. M.T. López de Roma

más o menos largo. Destaca también el modelado hidrodinámico del conjunto y sus detalles, lo que sólo tiene sentido si las ruedas fueron concebidas para que girasen con cierta velocidad. En la misma medida, llama la atención la aparente uniformidad existente entre ruedas de procedencias distintas, que podríamos interpretar como una prueba de contemporaneidad de las ruedas, pero que podría indicar también la estabilidad alcanzada por un buen diseño en el tiempo. Sin embargo, antes de llegar a cualquier conclusión, será preciso estudiar con más detalle los caracteres de las *rotas* que puedan tener un significado cronológico.

El objetivo de este trabajo es avanzar en la cronología de los restos de Riotinto conservados en el Museo de Huelva a través del estudio del aprovechamiento de material y su proceso constructivo, apoyándonos para ello en el análisis dendrocronológico. En el caso que nos ocupa, es importante incluir también la etapa de recuperación de los restos y el alcance de sus reparaciones, montajes e intervenciones posteriores. Esto permitirá abordar con mayor rigor la datación relativa y absoluta del material y su estudio comparado con las otras *rotas* conservadas.

La madera utilizada¹ y su procedencia

Está bien documentado el uso de madera de encina, alcornoque y roble en el entibado de galerías y en las propias ruedas encontradas en las explotaciones de la cuenca. Así se ha indicado el uso de roble y alcornoque en ruedas de São Domingos (GONZALO Y TARIN, 1888), Calañas (LUZÓN, 1975) y Riotinto (PALMER, 1927). Son también de roble el eje de la rueda de São Domingos (DOMERGUE et al., 1999), los cojinetes del eje de la *rota* del Museo de Huelva y la mayor parte de las clavijas utilizadas en esta última rueda (figura 1, arriba). La vegetación natural de la comarca del Andévalo onubense y sus zonas limítrofes se caracteriza por el predominio de formaciones mixtas de encinas (*Quercus ilex* L.) y alcornoques (*Quercus suber* L.). En la Sierra de Aracena el bosque natural se hace menos esclerófilo y a partir de los 700 m de altitud el alcornoque se mezcla con especies de ombroclima más húmedo como el quejigo (*Quercus faginea* Lam.) y el castaño (*Castanea sativa* Miller). Será necesario situarse por encima de los 840 m y sobre sustrato ácido para apreciar el mayor desarrollo del rebollo o melojo (*Quercus pyrenaica* Willd.) que llega a



3. *Abies* sp. Arriba: secciones transversal y tangencial. Abajo: sección radial con el campo de cruce. Radio de la *rota* restaurada. Imagen: M.T. López de Roma



4. Arriba: *Pinus sylvestris* L. o *Pinus nigra* Arnold. Testa pulida de tabla de cangilón. Abajo: *Fagus sylvatica* L. Clavija cilíndrica en el disco DD de la rueda. Imagen: Eduardo Rodríguez Trobajo

formar masas puras, aunque casi siempre rodeadas por castaños (MONTEAGUDO Y RODRÍGUEZ, 1991).

A partir de esta vegetación natural se ha desarrollado en el SO peninsular un sistema tradicional de dehesa que se refleja como dominante en la cartografía forestal del s.XVIII (GÓMEZ CRUZ, 1992). En la dehesa del Bodonal próxima a Zalamea, se autorizaba en 1767 la tala y entresaca de árboles viejos y leña dañosa para satisfacer las necesidades de carbón de la fábrica de cobre de Riotinto (BAUER, 1980). Una dinámica histórica de sobreexplotación en toda la comarca produjo la degradación de la vegetación arbórea y la intensa denudación del terreno, como es patente en el área de las explotaciones de Riotinto. Siguiendo a Pérez Macías (1998), se estima que los escoriales romanos de Riotinto alcanzaron los 6 millones de toneladas (RHOTENBERG et al., 1990) y que una cantidad similar de carbón vegetal debió ser necesaria para la fundición del mineral. La acumulación de derrubios y escorias alteró el sustrato e impidió la regeneración de la vegetación natural. En la primera mitad del siglo II d.C., las tablas de Vipasca regulaban el uso y venta de la madera como materia prima

esencial para las explotaciones de la cuenca minera (OREJAS SACO DEL VALLE, 2002).

La madera de pino negral (*Pinus pinaster* Sol in Aiton) fue utilizada en discos y tapas de la rueda del Museo de Riotinto (figura 2). Su identificación a nivel de especie se ha basado en las paredes de las traqueidas radiales, que permiten diferenciarla con seguridad de otras especies de pinos. Carecemos de datos que nos permitan delimitar con detalle la distribución de pino negral. Los restos ligneos encontrados en la presa romana de Proserpina que hemos estudiado muestran el uso del pino negral en dos momentos históricos muy alejados entre sí: un tapón del desagüe de la presa asociado a los niveles inferiores de sedimentos, que han sido datados en 0-260 d.C.; y una pértiga asociada a las reparaciones que se efectúan en la presa en el s.XVII. Existen otras referencias históricas de pinares de negral ya desaparecidos (SANTIAGO, 1994) y las formaciones espontáneas de *Pinus pinaster* actuales se reducen a pequeñas masas en enclaves rupícolas de Sierra Morena, como los situados entre las Sierras de Aroche y Aracena, en el sur de la Sierra de Tentudia (SANTIAGO, 1994) y en la Sierra de Navalmanzano (GIL, 1995).

Estos datos prueban el carácter espontáneo de las masas de *Pinus pinaster* en el suroeste peninsular, si bien las repoblaciones históricas de pinares se remontan cuando menos a la Baja Edad Media (Moguer, Palos, Medina Sidonia) (GONZÁLEZ GÓMEZ, 1977; LADERO QUESADA, 1992). Es a partir de la segunda mitad del s.XVIII cuando se incrementan las plantaciones de pino negral (resinero) y pino real (piñonero), y así en 1762 se repoblaba en la zona de Riotinto con piñón procedente de Niebla para abastecer los hornos de fundición de la nuevas explotaciones de cobre (NASH, 1904).

La madera identificada como pino silvestre o laricio (*Pinus sylvestris* L./*Pinus nigra* Arnold) es utilizada en varias ruedas: tablas de cangilones de la rueda de Riotinto del Museo de Huelva (figura 4, arriba) y fragmentos conservados de las ruedas de São Domingos y Tharsis (DOMERGUE et al., 1999; DOMERGUE Y BORDE, 2004). En la actualidad no se conocen masas espontáneas de estas especies en la región y las más próximas se encuentran en las Sierras de Cazorla y Segura (Jaén). La escasez de estudios paleobotánicos de la región nos impide verificar el carácter espontáneo de los pinares; pero no debemos descartar *a priori* su presencia natural, dada la gran amplitud corológica de estas especies en los últimos milenios, según muestran los hallazgos de macrorrestos y los registros polínicos (MARTÍNEZ, 1999). Sin duda, varias especies de pinos han tenido una notable dispersión en la vertiente atlántica peninsular, pero su aprovechamiento intensivo las ha llevado a situaciones críticas cercanas a su extinción. Uno de estos momentos debió producirse a partir del s.XIV, tal como prueba la casi desaparición del polen de pinos en los sedimentos recogidos en el Puerto de Palos (POZO et al., 1996). Es una época de activo comercio de la madera que era transportada incluso desde Galicia hasta Sevilla (CARLE, 1976). Otra crisis importante debió producirse en los extensos pinares del Algarve y la Extremadura portuguesa, que a lo largo de los s.X y XI abastecían de madera y pez a las atarazanas de Alcacer do Sal (*Al-Qasr*) y a los astilleros del sur (LOMBARD, 1959; LIROLA, 1993).

Una cuestión más difícil de evaluar es la procedencia geográfica de las maderas de abeto (*Abies* sp.) y alerce (*Larix* sp.), que han sido utilizadas como radios en la rueda y en las piezas sueltas del Museo de Huelva. La madera de abeto se ha identificado a nivel de género *Abies*, y sus caracteres principales son la ausencia de canales resiníferos y punteaduras tipo taxodioides en el campo de cruce

(figura 3). La madera de alerce es también identificada a nivel de género *Larix* y presenta los caracteres discriminantes de las punteaduras tipo piceoides y traqueidas axiales con punteaduras areoladas emparejadas (figura 5).

Actualmente, ninguna especie del género *Abies* crece espontáneamente en las proximidades de Riotinto, lo que induce a pensar que en el momento de construcción de la rueda sucedía lo mismo y que el material pudo ser transportado desde alguna localidad en que el abeto tiene presencia natural. En razón a la distancia, habría que considerar en primer lugar el pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.) de Grazalema (Cádiz) o de la Sierra de las Nieves (Málaga), en segundo lugar las zonas de pinsapar del Magreb, y como tercera opción el abeto albar (*Abies alba* Miller) de los Pirineos u otras regiones europeas. El fragmento de alerce encontrado junto con la pieza 138 del Museo de Huelva no procede de la Península Ibérica, y podría tratarse de *Larix decidua* Miller, cuyo hábitat natural son las montañas del centro de Europa, principalmente la región alpina.

Finalmente, en la elaboración de clavijas y espigas se utilizó sobre todo roble, pero también madera de fresno (*Fraxinus angustifolia* Vahl), que es especie frecuente en zonas de vaguadas y arroyos de la región. Su identificación es confirmada por la gruesa pared de sus grandes vasos (figura 1 abajo). Dos fragmentos de clavijas gruesas situadas en el disco DD de la *rota* y en la pieza 5491-1, así como varias clavijas finas, se han identificado como haya (*Fagus sylvatica* L.), sobre la base de su anillo poroso y radios característicos (figura 4 abajo). Actualmente, el área natural del haya es la mitad norte de la Península Ibérica, además de su amplia distribución en el centro y oeste de Europa.

Proceso constructivo y degradación

La unidad de construcción de la *rota* y el examen de autenticidad de sus piezas son análisis previos necesarios para la datación empírica del material. En este estudio de la actividad constructiva incluiremos los caracteres del diseño, las labores aplicadas y el estudio comparado con otras ruedas. La respuesta de la *rota* al paso del tiempo es un aspecto complementario en el que hay que diferenciar, además de las habituales fases de uso y abandono, la degradación generada durante las fases de recuperación de los restos y su posterior restauración.

Caracterización del material

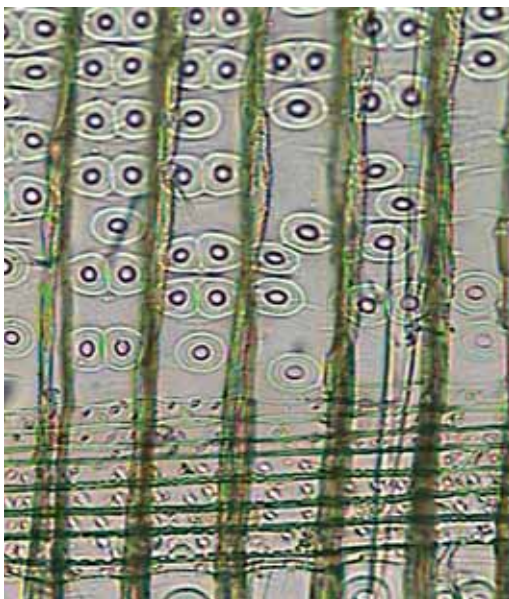
En la *rota* del Museo de Huelva se combinan distintas especies de madera en relación con el trabajo mecánico solicitado a cada pieza. Así podemos distinguir dos subconjuntos estructurales, circular y radial, de comportamiento diferente desde un punto de vista mecánico, en los que se utilizaron pino y abeto, respectivamente, conforme a la idoneidad de sus propiedades. La madera de pino negral, bastante densa pero nudosa y de fibra poco recta, era adecuada para elaborar el robusto sistema del cubo central (par de discos y sus tapas); mientras la madera de pino silvestre/laricio, de fibra más recta, fue reservada para la tabla de cierre de los cangilones. Por el contrario, la estructura radial, que se compone de tres elementos unidos entre sí (radios, tabicas de separación y traviesas), se construyó enteramente con madera de abeto de una densidad menor, pero más adecuada que el pino por su fibra muy recta y su mayor flexibilidad. Asimismo en los 4 travesaños de unión entre los dos discos se optó por la elasticidad de la madera de abeto frente a la mayor dureza del pino o del roble.

El maclado general de la *rota* se ha basado en la combinación de distintos ensambles entre piezas y un abundante enclavijado en el que se utilizaron maderas tenaces como roble, fresno y haya. Completaban el ingenio mecánico dos tipos de piezas que soportaban el peso total de la rueda: el cojinete de apoyo del eje, que es un simple rollizo de roble, y un forro encastrado en los dis-

cos que servía de unión al eje, pieza no conservada que sería de una madera dura como encina o roble.

En cuanto a los tres “semidiscos” que se conservan en el Museo de Huelva, se constata idéntico uso de estas especies en relación con sus funciones. Las piezas 491 (nº inv.: 5491-A) y 138 (nº inv.: 6584) conservan sendos fragmentos de radio de abeto insertos en su mortaja. Otra coincidencia significativa es el uso de madera de haya tanto en los pernos del disco DD de la *rota* como en los del semidisco 5491-1. La diferencia más destacada es el fragmento de radio de alerce que tenía alojado en una de sus cajas la pieza 138, especie no presente en la *rota* restaurada.

Por otra parte, es un hecho evidente que el labrado y armado de las *rotas* fue realizado con madera verde o empapada, con las mismas condiciones de máxima humedad en que la máquina iba a trabajar. Esto se comprueba fácilmente tomando las medidas de las piezas actualmente secas. Los discos y tapas de la rueda restaurada tienen forma elipsoide con ejes de 810 y 780 mm, según las direcciones axial y radial de la madera respectivamente; y lo mismo sucede con las tres piezas sueltas de discos que tienen 980 x 950 mm. Se constata, por tanto, que la merma radial de la madera de pino ha sido de un 3%; contracción similar a la observada en otras piezas de abeto como las tabicas, que una vez secas, han mermado y dejado ranuras de 1-2 mm en el interior de los cangilones.



5. *Larix* sp. Izquierda: sección transversal. Testa pulida de un radio. Derecha: Sección radial del campo de cruce. Imagen: M.T. López de Roma

Elementos constructivos

La *rota* restaurada tiene 25 radios mientras que las tres piezas de disco sueltas formaron parte de otras ruedas de 27 radios que suponemos de tamaño ligeramente mayor. Lógicamente, difieren en algunos caracteres ligados al tamaño que son algo menores en la *rota*, como el diámetro y grosor de los discos (81 x 4 y 98 x 5 cm), o la longitud de las mortajas donde se insertan los radios (10 y 12 cm). Existen también diferencias de labrado entre las piezas sueltas y la *rota* restaurada. Así en las tres piezas sueltas se observan en una de sus caras huellas de hacha y azuela, a hilo y contrahilo, mientras que la *rota* restaurada tiene un perfecto acabado de cuchilla en ambas caras. Podemos considerar que, en líneas generales, la elaboración de la *rota* fue más cuidada que en los otros casos.

Sin embargo, el resto de características de diseño muestra total concordancia: hay una coincidencia general en la posición y medidas de los cajeados, en las medidas de espigas y clavijas, e incluso en detalles mínimos como el pequeño bisel de 6 mm en el canto de los discos. Asimismo las huellas del trazado a punzón son semejantes: círculos para situar las mortajas de los radios, trazos en diagonal para las cajas de travesaños de unión de discos, etc. Podemos inferir, en definitiva, que todo este material fue trabajado siguiendo unas mismas reglas y medidas preestablecidas.

La estructura circular. Las piezas de pino de mayor tamaño son los discos centrales (capítulo IV, figuras 5, 7 y 8). Su despiece es radial en todos los casos, si bien se evitaba incluir la médula para mejorar la integridad de la pieza. Los dos discos de la *rota* se componen de dos piezas desiguales, sin que la mayor llegue a sobrepasar la caja central. Esta desigualdad se observa también en las piezas sueltas y obedece, sin duda, a un buen aprovechamiento de los diferentes diámetros del tronco. Como es probable que la selección de piezas fuese realizada en un mismo momento, también consideramos posible que las dos piezas fuesen extraídas de un mismo árbol.

El ensamblaje de las dos piezas de cada disco consiste en un doble cajeadado con lengüetas de unión trabadas por clavijas de 13 mm de diámetro. La posición de las semicajas no es fija en las tres piezas sueltas, e incluso en la pieza 138 una caja se desplazó algo para evitar una zona nudosa. De la no coincidencia del cajeadado se deduce que sólo el semidisco 5491-1, que está muy incompleto, podría formar un disco con alguna de

las otras, por lo que no podemos saber a cuántas ruedas pertenecen las piezas. Por otra parte, constatamos que el ensamblaje anterior es el único utilizado en la *rota* restaurada; y que un refuerzo adicional de dos travesaños que tienen actualmente sus discos es un añadido moderno.

Las tapas de los discos (capítulo IV, figura 5) permitían la inserción de los radios en el cubo central, al tiempo que proporcionaban mayor solidez al conjunto. Una primera observación es que las tapas conservadas no son las originales de la *rota*, ya que no existe correspondencia entre las perforaciones de tapas y discos. Sin embargo, las tapas sí forman pareja pues coinciden exactamente sus cuatro cajas destinadas a los travesaños de unión de los discos. Por tanto, estas piezas debieron ser tomadas de otra *rota* de tamaño igual a la restaurada, por lo que podemos suponer que serían parecidas a las originales. El sistema de trabado entre tapa y disco constaba de 8 gruesas clavijas redondas de 13 mm y numerosas clavijas cuadradas de 7 mm en la periferia que aseguraban la sujeción de los radios al cubo central. Se observa cómo el enclavijado de los radios se hacía con sumo cuidado, desplazando algo el taladro para evitar algunos nudos.

En la construcción de cada tapa se utilizan cuatro piezas subradiales que se unían entre sí mediante dos travesaños paralelos que no se han conservado, y sólo observamos los cuatro orificios circulares de 13 mm que tenían en sus extremos. Estas clavijas o pernos eran pasantes pues existen cuatro orificios concordantes en los discos, que indican además que las tapas se montaban sobre los discos haciendo que la fibra de ambas partes se cruzara perpendicularmente entre sí. Este sólido montaje se aplicó de manera idéntica a los tres semidiscos sueltos del Museo de Huelva, tal como muestran sus taladros.

La corona de cangilones está formada por tablas de pino silvestre/laricio que se cortaron a sierra, si bien el trabajo fue diferente según se tratara de tablas de contorno o de tablas laterales (capítulo IV, figuras 12 y 26). Las primeras se cortaban con sólo 10 mm de grosor y sin importar que fueran algo descentradas o tangenciales. Actualmente estas piezas están muy fracturadas, pero a la vista de las pocas uniones a bisel que muestran, deducimos que las piezas debían ser bastante largas para cubrir varios cangilones, reduciendo así el número de juntas. Todavía se conservan algunas tablas que cubren tres cangilones e incluso hasta cinco, llegando a superar los 2,5 m de longitud. En cualquier caso,

el curvado de tablas tan largas era fácil gracias a su escaso espesor y a estar mojadas.

Por el contrario, las tablas laterales fueron cortadas a mayor grosor (15 mm) pues no tenían que curvarse, pero requerían piezas más anchas debido a su contorno en curva. Por este motivo, se reducía el número de cangilones a cubrir por pieza, que en la *rota* no supera nunca los dos cangilones. Actualmente se conservan 6 tablas dobles, si bien muchas tablas están rotas por la débil unión entre cangilones. El estudio detallado de fracturas y ensambles en bisel de estas piezas que ha realizado Manzano Beltrán (capítulo IV) indica que la *rota* original pudo estar integrada sólo por tablas laterales dobles –más una simple que completaría los 25 cangilones–, reduciéndose así el número de juntas a la mitad. Al mismo tiempo, estas piezas se disponían de manera alterna a ambos lados de la rueda para que no coincidieran las juntas en el mismo cangilón.

La estructura radial. En la *rota* esta estructura es enteramente de madera de abeto y está formada por los radios, tabicas y traviesas. Los radios (capítulo IV, figura 10) tienen un corte radial perfecto y secuencias cortas de 10-30 anillos siempre alejadas del centro, lo que garantiza la ausencia de tensiones internas dentro de la pieza. Se seleccionó una madera desprovista de nudos y de fibra tan recta que los anillos prácticamente se mantienen paralelos a lo largo de todo el radio (1,85 m). Las tabicas (capítulo IV, figuras 13 y 22) tienen también despiece radial y alejado de la médula, que debió realizarse por hendido a juzgar por la longitud de los radios visibles en sus caras laterales. Es característica su forma trapezoidal con una convergencia de 1° entre sus cantos laterales que están provistos de una lengüeta de doble ancho para su ensamble a los radios. Asimismo en una de sus caras mayores se labró una forma aquillada que tiene huellas de 3-3,5 cm de una pequeña azuela. Finalmente, la madera de zonas próximas a la médula fue reservada sistemáticamente para labrar las traviesas exteriores (capítulo IV, figura 17), piezas de poca longitud para las que no importaba tanto la rectitud de fibra. En definitiva, la elección de cortes para cada tipo de pieza fue realizada con un criterio de máximo aprovechamiento de la madera de abeto.

El enclavijado. Se ha indicado anteriormente que el enclavado de las piezas que integran las *rotas* se realizó con madera excluyendo los metales. Diferenciamos entre clavos *sensu strictu*, de sección cuadrada y forma



6. Las clavijas pequeñas (7 x 7 x 70 mm) son cuadradas y apuntadas, mientras las grandes son cilíndricas (13 mm Ø)

apuntada, y clavijas cilíndricas de mayor tamaño (figura 6). En general, los primeros se hicieron de madera dura y densa (0,9-1,5 gr/cm³), como roble y fresno, pero también se han encontrado algunas clavijas de haya en las piezas 5491-1 y 138 (6584). Asimismo se utilizó madera de haya en las clavijas o pernos que se encuentran tanto en el disco DD de la *rota* (figura 4, abajo) como en la pieza 5491-1. Los clavos finos de 7 x 7 x 70 mm, o algo menores, fueron usados en gran número en la unión de las tablas de contorno, internas y externas, con las laterales, así como para trabar varios ensambles: radio-tabica, radio-traviesa exterior y tabla lateral-radio-tabica. Se utilizaron también clavos cuadrados algo mayores, hasta 10 x 10 mm, en toda la periferia de los discos para su unión a la tapa y para la inserción de los radios. Las clavijas de 16 mm de diámetro se utilizaron en el trabado de las lengüetas de unión entre semidisks, y los pernos de 13 mm de diámetro y longitud mayor se usaron para reforzar la unión entre discos, tapas y sus travesaños.

Similitud y diferencias constructivas entre ruedas

Tal como indicábamos en la introducción, es evidente que las distintas ruedas presentan una elevada similitud constructiva tanto en su configuración general como en los más mínimos detalles. A partir de esta

unidad en trazas y labores, debemos evaluar las diferencias entre los ejemplares conservados que puedan tener un significado cronológico.

En primer lugar, se observa un conjunto de variaciones métricas que son inherentes a las propias reglas de trazado. Así, el diámetro total de las ruedas oscila en torno a los 4,6 m y su número de radios es 27, a excepción de la rueda del Museo de Huelva que tiene 4,30 m y 25 radios. El cubo central de esta última es también algo menor (diámetro/espesor: 80/4 cm, frente a 90-100/3,8-5 cm del resto) y sus mortajas son más cortas (10 cm, frente a 10-12 cm del resto), pero no se observan otras diferencias significativas. En todas las ruedas los cangilones tienen un largo medio de 49-50 cm, si bien resultan ligeramente más anchos y altos en Riotinto que en Tharsis y São Domingos.

En segundo lugar, hay una serie de detalles o soluciones que se aparta en cierta medida de las reglas de trazado general, que puede tener alguna significación. La construcción del cubo central es básicamente la misma en todas las ruedas. Sin embargo, los discos centrales de los ejemplares del Museo de Huelva están compuestos de sólo dos piezas, mientras que en el resto son tres.

Otra diferencia clara es el número de travesaños por tapa que son dos paralelos en todos los casos excepto en las ruedas de São Domingos, que tienen cuatro travesaños cruzados entre sí, tal como se observa en los dibujos antiguos (DOMERGUE et al., 1999). Otro detalle constructivo de interés se observa en las inserciones de los radios en las mortajas de los discos, que en las ruedas del British Museum y en la de São Domingos se estrechan hacia el interior del disco y se biselan con objeto de que los radios adopten su convergencia. Por el contrario, en la *rota* del Museo de Huelva las mortajas son casi rectas y en los semidiscos algunas tienen ligera forma de cola de milano.

Los radios presentan un ensanchamiento en su mitad exterior en todos los ejemplares, salvo en la rueda de São Domingos en la que los radios sólo tienen una escotadura en uno de sus lados. El labrado de una quilla en una de las caras mayores de las tabicas sólo se observa en las ruedas procedentes de Riotinto, si bien en la expuesta en el British Museum han sido montadas erróneamente al revés (WEISGERBER, 1979). Las juntas de unión entre las tablas de contorno de los cangilones presentan algunas diferencias entre las distintas *rotae*. En términos generales, la unión de dos tablas contiguas es

| SERIES | POSICIÓN | INTERVALO | TEST t | TEST W | C. CONFIANZA |
|-------------------|----------|-----------|--------|--------|--------------|
| E2110020/E211028C | 272/237 | 237 | 15,64 | 78,2 | > 99,9 |
| E211026A/E211027A | 92/98 | 92 | 7,10 | 70,3 | > 99,9 |
| E2111010/E2111020 | 137/120 | 120 | 14,02 | 75,2 | > 99,9 |
| E2111010/E211103A | 86/80 | 86 | 6,44 | 71,2 | > 99,9 |
| E211102A/E211103A | 69/80 | 69 | 6,16 | 64,7 | > 99,9 |

Tabla1. Sincronización de series de discos de ruedas

| PIEZA/MUESTRA | REFERENCIA | EDAD CARBONO Años BP | EDAD CALIBRADA Años CAL | AÑOS A SUMAR | EDAD PIEZA Post Quem |
|-----------------------------|------------|-------------------------|--|-----------------|-------------------------|
| Cangilón 22 <i>rota</i> /1C | Ua-17141 | 1851 ± 28 ¹ | 80 AD-240 AD (95,4%) | 23 | 103 AD-263 AD |
| Cangilón 22 <i>rota</i> /1D | Ua-17541 | 1933 ± 26 ² | 20 AD-130 AD (95,4%) | 79 | 99 AD-209 AD |
| Pieza 138 (6584) /1A | Ua-19640 | 1990 ± 45 | 110 BC-130 AD (95,4%) | 108 | 2 BC-238 AD |
| Pieza 138 (6584) /1B | Ua-21245 | 1880 ± 35 | 60 AD-240 AD (95,4%) | 38 | 98 AD-278 AD |
| Disco DD <i>rota</i> /2A | Ua-17542 | 2050 ± 41 ³ | 180 BC-30 AD (93,5%) 40 AD-60 AD (1,9%) | 149 | 31 BC-209 AD |
| Disco DT <i>rota</i> /28C | Ua-23117 | 1965 ± 45 | 60 BC-140 AD (95,4%) | 85 | 25 AD-225 AD |
| Disco DD <i>rota</i> /25A | Ua-21246 | 1945 ± 40 | 50 BC-140 AD (95,4%) | 58 | 8 AD-198 AD |
| Radio de alerce /10A | Ua - 24129 | 1960 ± 40 | 50 BC - 130 AD (95,4%) | 38 | 12 BC - 168 AD |

1. Media de 2 medidas independientes de la misma muestra: 1880 ± 55 y 1841 ± 32 años BP 2. Media de 3 medidas independientes de la misma muestra: 1950 ± 65, 1933 ± 37 y 1925 ± 45 años BP
3. Media de 2 medidas independientes de la misma muestra: 2040 ± 70 y 2055 ± 50 años BP

Tabla 2. Mediciones carbono-14 individuales

a bisel, pero se observan algunas variantes, como en la rueda de Riotinto del British Museum que tiene las tablas laterales unidas a media madera, o la mayor variedad de ensambles en la rueda de São Domingo, con algunas tablas unidas a espiga y horquilla. Finalmente, se observan otras diferencias menos significativas como el número de clavijas en radios y tablas de cangilones.

Deformaciones y degradación del material

En términos generales podemos afirmar que el comportamiento mecánico de las distintas piezas ha sido satisfactorio demostrando los aciertos constructivos en la elección de la especie de madera y en el despiece. Pese al drástico secado que ha soportado la *rota*, se ha conservado íntegro un sector de 5 cangilones con sus piezas perfectamente macladas entre sí. Asombra también la rectitud de los radios tras su secado siendo piezas de 1,85 m de largo y tan sólo 2,5 cm de grosor.

En el conjunto armado se originaron sólo algunas deformaciones debidas al estado plástico de las piezas embebidas en agua. Así algunas clavijas se han curvado por

el esfuerzo que soportaban en las juntas de las piezas (figura 6). Sin embargo, una deformación más importante afectó a las tablas, que presentan una ligera flexión de unos 2 mm de luz en dirección radial de la rueda. Estas piezas, que tenían que soportar todo el peso del agua en el movimiento ascendente del cangilón, tenían reducida su unión con los radios a una doble lengüeta de sólo 4,5 cm frente a los 13 cm de su ancho total. Sin embargo, este fallo menor de diseño no debió afectar apreciablemente a la estanqueidad del cangilón.

Por otra parte, las condiciones de trabajo de la rueda, sometida al continuo rozamiento del agua cargada de partículas minerales, han producido un desgaste patente en muchas piezas. El efecto más generalizado es una erosión diferencial en cada anillo entre sus partes de madera más blanda (primavera) y más dura (verano). Este desgaste se produce del mismo modo en todas las maderas, si bien fue más acusado en el abeto por su menor dureza. Así, en las traviesas exteriores, el continuo impacto del agua ha producido una superficie estriada, desgaste que algunos autores han atribuido a la acción humana en la tarea de impulsar la rueda con los pies (PALMER, 1927).



7. Series dendrocronológicas de varias piezas de discos de la rota y de las 3 piezas sueltas del Museo de Huelva

Sin duda, la degradación más intensa se produce a partir del momento en que se recuperaron los restos. Por un lado, podemos asociar las ligeras pudriciones detectadas en el material a la etapa más reciente, cuando el material se ha encontrado en niveles de humedad por debajo del 20%. Sin embargo, esta degradación ha sido mínima gracias a la acción fungicida de las sales de cobre y cinc que impregnan la madera. Por otra parte, la contracción diferencial que afectó a piezas, como discos, tapas y tabicas, ha sido importante e incluso las clavijas muestran su merma adquiriendo una forma romboidal. Asimismo se observan algunas piezas abarquilladas, sobre todo en las tablas laterales por su despiece tangencial. Con todo, el peor efecto del secado ha sido la formación de secuencias de fisuras regularmente espaciadas que se formaron sobre la madera menos densa de los anillos. Al producirse cuando la *rota* ya no estaba en funcionamiento, estas fisuras son limpias, sin depósitos de sales minerales en su interior.

Estudio dendrocronológico

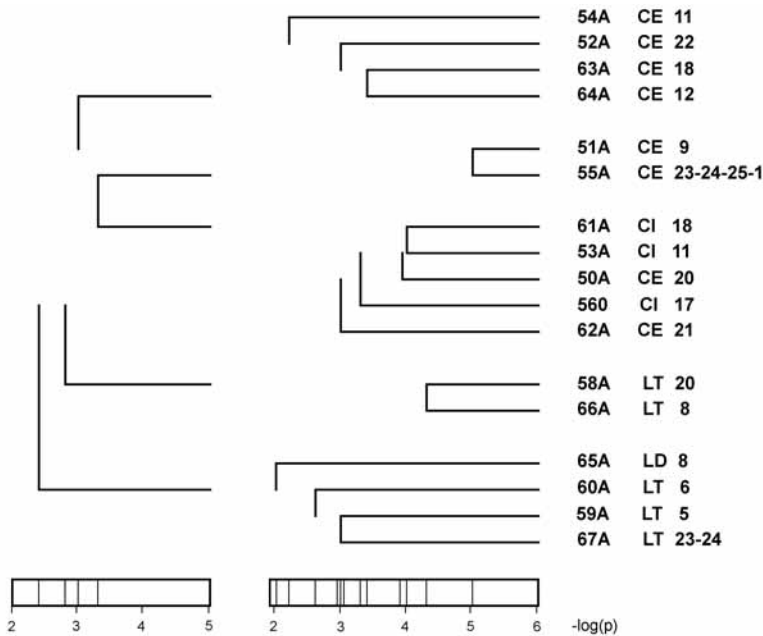
La falta de cronologías de referencia para las especies y la edad del material aquí estudiado nos impide ensayar la datación absoluta por dendrocronología que, no obstante, proporciona un método de análisis constructivo que completa el realizado en el apartado anterior. Otro

resultado de interés metodológico es la elaboración de nuevas series que servirán como referencias futuras y cuya datación aproximada es aportada por las dataciones carbono-14 que se realizan en este trabajo.

Los discos centrales

Las piezas de mayor tamaño componen el cubo o *rotae modiolio* de las ruedas de drenaje. Se han estudiado los dos discos que forman parte de la *rota* y los tres fragmentos de discos que se conservan en el Museo de Huelva. Una característica común a todo el material es su constitución homogénea: madera de pino negral en despieces casi radiales que contienen largas secuencias de anillos. Sin duda, se trata de un buen material desde el punto de vista dendrocronológico, si bien la forma circular de las piezas ha obligado a combinar la medición transversal (cantos) y radial (caras planas).

El disco DD de la *rota* se compone de dos piezas de tamaño desigual que están muy fisuradas y tienen varios injertos y rellenos de resina de antiguas intervenciones. La pieza mayor consta de dos radios desiguales, en el menor de los cuales los anillos son muy finos y presentan anomalías de anillos ausentes. Una vez corregidos y sincronizados los dos radios, se obtuvo la serie E2110020 con 280 años. En la pieza menor con dos radios se obtiene la secuencia E211026A de sólo 98



8. Diagrama de acreción de las series medidas en las tablas de contorno internas y externas (CI y CE) y en las tablas laterales delanteras y traseras (LD y LT)

años. El disco DT se compone también de dos piezas desiguales, cuya pieza mayor tiene un radio E211028C con 180 anillos y la pieza menor de dos radios sólo tiene 60 anillos (E211027A). El resultado de la interdatación de las cuatro piezas se presenta en la tabla 1. En síntesis, se obtiene una sincronización doble entre las piezas mayores y las menores, pero no hay sincronización entre los dos pares. Los valores son elevados e indican que cada pareja procede de un árbol.

En la figura 7 se muestra un intervalo de las series de las piezas mayores y menores. La pieza 20 (disco DD) tiene su médula 35 anillos anterior a la de la pieza 28C (disco DT), por lo que ésta procede de una parte más alta del tronco. Estas dos series componen una media (7S) de 299 años, pero el árbol superaría claramente esta edad en el momento de ser aprovechado. Las series menores 26A (disco DD) y 27A (disco DT) proceden de un árbol distinto y la pieza 27A ocuparía una posición inferior en el tronco, ya que su médula es 6 años anterior a la de la pieza 26A. La serie media (6S) alcanza solamente los 98 años, pero no sabemos qué edad tendría este árbol, que podría incluso ser similar a la del otro árbol si estas piezas fueron extraídas de su parte más alta.

Las piezas sueltas depositadas en el Museo de Huelva son también partes de cubo de otras ruedas y contienen 3 series: E2111010 (pieza 138), E2111020 (pieza 5491A) y E211103A (pieza 54911) con 130, 121 y 90 años respectivamente. La interdatación entre las mismas (véase tabla 1) indica que las piezas 138 (010) y 5491A (020) fueron extraídas del mismo árbol, mientras que la pieza 54911 (03A) procede de un árbol diferente. En la figura 7 se muestra la similitud entre las tres series y se comprueba que en la pieza 138 la médula antecede 12 años a la de la pieza 5491A, por lo que esta pieza tenía una posición superior en el tronco. Por otra parte, la pieza 54911 se extrajo de otro árbol diferente aunque próximo, y es posible que los dos árboles tuviesen una edad parecida, a la vista de que sus médulas difieren sólo en 4 años. Podemos inferir, por tanto, que la madera de estas piezas fue aprovechada en una misma masa forestal.

Las tablas de cierre de los cangilones

Tal como se ha descrito, en el anillo de cangilones o *modioli quadrati* se diferencian las tablas de contorno, que forman las paredes interna y externa de cada compartimento, y las tablas laterales, que completan el cierre y contienen las toberas de entrada y salida de agua.

Si bien tienen formas diferentes, toda esta madera es de una misma especie, pino silvestre/laricio, por lo que es oportuno su estudio conjunto. La tarea de medir ha estado condicionada por el estado de conservación de cada pieza, y se ha tenido que limitar a las caras mayores ya que los cantos de estas tablas son impracticables. En total se estudiaron 19 piezas pertenecientes a 16 cangilones, en la mitad de los cuales se pudo estudiar más de un componente.

En el ensayo de sincronización se han obtenido coeficientes de coincidencia (*método W*) y valores de “t” (*método de correlación*) poco elevados y desiguales; no obstante, con el apoyo visual se han llegado a interdatar fiablemente 17 de las 19 series comparadas. En el *grafo de acreción* de la figura 8, se muestra la sincronización de todas las series aplicando el *método de coincidencias dobles*, cuyas significaciones son más reducidas que en los métodos anteriores, pero de mayor fiabilidad. El diagrama proporciona además información para analizar la heterogeneidad del material y sus relaciones de procedencia. Una similitud entre tablas con nivel de significación superior a 3 indica que, probablemente, las dos tablas fueron extraídas del mismo árbol, y niveles mayores a 4 ó 5 indican además que las tablas formaban parte de la misma pieza antes de ser cortadas.

De la lectura del grafo deducimos que la tabla externa 55A, que cierra 5 cangilones (22-25 y 1), se continuaba con la pieza 51A (tabla externa del cangilón 9) formando una única tabla de 3,2 m, que fue cortada separando la pieza menor que se colocó en otro cangilón. Otros caracteres como la dirección de la fibra, inclinación del corte de la sierra, etc., confirman este proceso. La misma interpretación es aplicable a otras tablas sueltas como las externas 63A y 64A (cangilones 18 y 12), o el grupo de tablas internas 53A, 560 y 61A (cangilones 11, 17 y 18, respectivamente). Incluso se detecta la procedencia del mismo árbol de varias tablas externas e internas, tal como indica la proximidad y alternancia de sus series dentro del diagrama. En resumen, podemos conjeturar que todas las tablas de contorno estudiadas fueron extraídas del mismo árbol, o a lo sumo de 2 árboles próximos entre sí.

Por el contrario, las tablas laterales se disponen en el diagrama a cierta distancia del grupo de tablas de contorno, lo que indica una procedencia distinta. Tampoco se observan similitudes elevadas entre las tablas de este grupo y únicamente la 58A y la 66A (cangilones 20 y 8) fueron extraídas del mismo árbol. La explicación de la

mayor heterogeneidad de las tablas laterales está en su forma curvada que dificulta obtener varios despieces de un mismo tronco. Como consecuencia de lo expuesto, sólo a partir de las tablas de contorno se ha podido elaborar una única cronología de 11 series y 116 años, mientras que las tablas laterales han tenido que ser agrupadas en 3 pares de series independientes.

Las tabicas radiales de los cangilones

Se han estudiado las 23 tabicas que se han conservado en la rueda. Tal como se ha indicado, todas estas piezas son de madera de abeto (*Abies sp.*) y presentan un despiece radial perfecto, lo que ha facilitado la medida de las secuencias en sus cantos. Se trata de una madera de crecimiento uniforme, extraída de zonas separadas de la médula, y en consecuencia la longitud de las series es parecida (entre 70 y 100 anillos).

El ensayo de sincronización ha dado valores altamente significativos ($t > 9$ y coef. coincidencia $> 80\%$, sobre intervalos ≈ 70 anillos), que han permitido el agrupamiento de tabicas en 3 conjuntos: 3S (6, 8, 10, 13, 14, 24, 25), 4S (4, 5, 12, 16, 18, 19, 23) y 5S (7, 9, 15, 17, 20, 22). Han quedado aisladas únicamente las tabicas 1, 11 y 21. Sin embargo, la interdatación entre estos grupos no ha dado resultados positivos. Los niveles de crecimiento varían ligeramente, de menor a mayor, en los grupos 3S, 5S y 4S, lo que sugiere la posibilidad de que los grupos procedieran del mismo árbol, aunque de tramos disjuntos del radio, por lo que no llegan a solapar y sincronizar entre sí. Sin embargo, los tres grupos presentan tendencias poco pronunciadas, e incluso algo ascendentes en 3S y 4S, y no hemos podido encontrar una ordenación clara de los grupos a lo largo del mismo radio.

En la figura 9 se presentan los grupos con sus respectivas medias que evidencia el buen ajuste de todas las series dentro de cada grupo. Por otra parte, hacia la mitad del grupo 5S, se observa un período de crecimiento anómalo que se inicia con una caída brusca de un año respecto al siguiente que dura 3 ó 4 años más, y acaba con una lenta recuperación en los 21 años posteriores. Esta *signatura* parece ser una respuesta individual, pues no se ha encontrado repetida en otros grupos de series, y consideramos que es debida a un proceso traumático producido por alguna causa puntual (incendio, ataque de plagas, movimiento del terreno, etc.) más que a una perturbación climática.

El ajuste de las series de cada grupo, junto con la continuidad de vetas entre piezas, indica que cada grupo de tabicas procede de una tabla. Los grupos 4S y 5S formaban dos tablas, con al menos 6-7 piezas, y longitud superior a 1,4 m. Por el contrario, en el grupo 3S las piezas 13A y 15A (en azul en la figura 9 superior) se inician y acaban antes que las 4 piezas restantes, de las que difieren además por su menor crecimiento. Por consiguiente, estas dos piezas no pertenecen a la misma tabla que el resto del grupo, si bien su elevada similitud indica que fueron extraídas del mismo tronco. La falta de relación entre tabicas y sus posiciones en la rueda indica que las piezas se mezclaron tras ser cortadas pero que se utilizaron acto seguido en el montaje de la rueda.

Muestreo y resultados carbono-14

La elección de los puntos de muestreo para la datación carbono-14 se ha basado en el agrupamiento de piezas obtenido del estudio dendrocronológico precedente. Por una parte, se han elegido en la rueda restaurada el grupo 5S (110 años), formado por 6 tabicas de madera de abeto, y el grupo 7S (299 años) compuesto por dos piezas de pino negral de los discos. De este modo, podremos conocer y comparar la cronología de las dos especies principales que se utilizaron en la construcción de la rueda. Por otra parte, se ha considerado de interés prioritario estudiar la cronología del material suelto conservado en el Museo de Huelva, por lo que se ha elegido la pieza 138 con una secuencia de 137 años que forma parte del cubo de otra rueda hidráulica. Por último, se incluyó también el único radio de madera de alerce que planteaba dudas sobre su originalidad.

La opción básica del muestreo ha sido tomar al menos dos muestras en cada una de las piezas, en lugar de muestrear un mayor número de piezas, favoreciendo así la precisión y fiabilidad de los resultados. Con objeto de que las muestras fuesen mínimas, se optó por utilizar la técnica AMS (*acceleration mass spectrometry*) que requiere tan sólo miligramos de madera. El tratamiento y medición han sido realizados en todos los casos por el *Angström Laboratory* de la Universidad de Uppsala (Suecia). En la tabla 2 se recogen los resultados obtenidos indicando la procedencia y posición de cada muestra, así como el término “anillos a sumar” que son los anillos/años que hay que añadir a cada datación para que ésta corresponda al último anillo conservado en cada pieza o conjunto de piezas interdatadas.



9. Series dendrocronológicas de las tablas de los cangilones de la rota agrupadas por su pertenencia a la misma tabla

| SECUENCIA | MÉTODO I: GAUSS WM (Años CAL) | MÉTODO II: OXCAL (Años CAL) | AÑOS A SUMAR | EDAD PIEZA Post Quem |
|-------------------------|----------------------------------|--|-----------------|--------------------------|
| Cangilón 22 <i>rota</i> | 88 AD-183 AD (99%) | 76 AD-186 AD (95,2%) | 23 | 111 AD-206 AD (método I) |
| Pieza 138 (6584) | 76 AD-131 AD (99%) | 30 AD-100 AD (2,0%) 50 AD-160 AD (90%) 170 AD-200 AD (3,4) | 38 | 114 AD-169 AD (método I) |
| Discos <i>rota</i> | 8 AD-87 AD (99%) | 9 BC-121 AD (95,4%) | 58 | 66 AD-145 AD (método I) |

Tabla 3. Calibración de secuencias

El primer aspecto destacable es la homogeneidad de todos los resultados en *edad carbono*, tanto de las medidas repetidas de la misma muestra, como de los pares de muestras secuenciadas. Únicamente se ha obtenido un resultado heterogéneo sobre una muestra equivalente a la 28C que dio 2630 ± 55 , que se califica de aberrante y se ha excluido de los cálculos. Por consiguiente, se han recombinado las diferentes medidas de cada muestra para lograr una reducción del error de estimación. En este punto es preciso matizar que la validez de los términos de error adjuntos a cada medición es realmente el error del modelo teórico con 2σ (95,4%), que no considera las fuentes de error que inciden tanto en la precisión como en la desviación sistemática asociada al laboratorio. Se trata pues de un error mínimo que debería corregirse con un factor de multiplicación que nos es

desconocido pero que, en cualquier caso, debe ser tenido en cuenta en la evaluación final de los resultados. En la tabla 2 se incluyen también las *edades calibradas* correspondientes a las anteriores *edades carbono* que se han obtenido a partir de la curva de calibración *Intcal98* (STUIVER et al., 1998).

El fundamento de la calibración y su importancia para la obtención de edades en años solares puede encontrarse en Aitken (1990). La operación de calibración es crucial pues modifica la precisión de la datación dependiendo de las variaciones de la curva de calibración, llegando a veces a la fragmentación de los intervalos, tal como se observa en uno de los resultados de la tabla anterior. En el presente estudio se ha adoptado la técnica de calibración conocida como *wiggle matching* o de

secuencias definidas, que se adapta a las secuencias de anillos de la madera y permite recombinar medidas de piezas diferentes si han sido previamente interdatadas por dendrocronología. De este modo, hemos podido rastrear a lo largo de cada secuencia de anillos las posiciones más favorables para la calibración de los resultados.

Se han desarrollado distintos procedimientos de *wiggles matching* (BRONK RAMSEY et al., 2001) de los que hemos seleccionado dos métodos que aportan enfoques estadísticos complementarios. Por un lado, el denominado método *Monte Carlo Wiggle Matching*, que está basado en una simulación numérica del modelo de estimación clásica o *a posteriori*, que aplica el programa *GaussWM* (WENINGER, 1997) y que denominaremos método I. Por otro lado, el método de estimación bayesiana que trabaja con probabilidades *a priori* (BUCK et al., 1992) y que ha sido aplicado mediante el programa *Oxcal3.9* (BRONK RAMSEY, 1998) que denominaremos método II. La evaluación conjunta de ambos procedimientos refuerza el análisis de comparación adicional de los resultados. En la tabla 3 se incluyen los intervalos en edades calibradas correspondientes a todas estas pruebas, que pasamos a comentar brevemente.

En la figura 10 se recoge gráficamente el proceso de calibración de la tabica del cangilón 22 de la *rota*. La toma de muestras se realizó en dos tiempos de manera que se pudiera utilizar el primer resultado como referencia para mejorar la localización del segundo punto de muestreo. Asimismo se realizaron varias medidas de ambas muestras que han probado su fiabilidad y han permitido la recombinación de los resultados con la consiguiente disminución del error típico. En estas condiciones el periodo resultante en edades reales se ha reducido bastante: a 110 años en el método II y sólo 95 años en el método I. Si comparamos las estimaciones, se aprecia buena convergencia en la posición de los intervalos y sus máximos de probabilidad, si bien en el método I se observa el mayor “contraste” de probabilidades, de modo que el intervalo es más discontinuo a la par que más reducido. A la vista de estos resultados, la secuencia de anillos de esta pieza no presenta nuevos puntos de muestreo con calibración más favorable.

En la figura 11 se recogen los resultados de la datación de la pieza 138, fragmento de disco de una rueda que se conserva en el Museo de Huelva. Como en el caso anterior, se procedió a tomas de muestras distanciadas para poder mejorar la estimación conjunta. El comportamiento de los

dos métodos de estimación es análogo al caso anterior, pero al coincidir en un tramo de la curva de calibración más favorable que el anterior, se obtiene por el método I un intervalo de edades calibradas de sólo 55 años. Por otra parte, la secuencia dendrocronológica es bastante mayor y permitiría un incremento de la precisión muestreando en posiciones más tempranas de la secuencia.

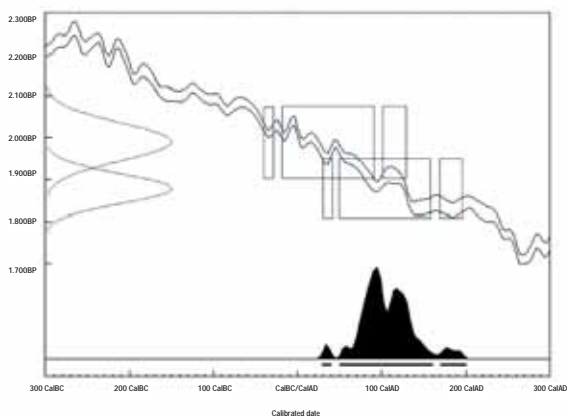
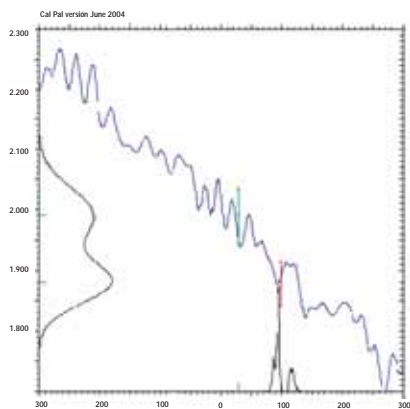
En la figura 12 se recogen los resultados del grupo 7S que agrupa tres piezas diferentes que forman parte del cubo central de la rueda restaurada. La interdatación dendrocronológica previa ha permitido la búsqueda sucesiva de los mejores puntos para la calibración a lo largo de una serie de 299 anillos. La datación de tres muestras secuenciadas, que precede a las anteriores, se sitúa en un tramo de calibración difícil debido a las fuertes oscilaciones de la curva, por lo que no existen puntos de muestreo más favorables en esta serie.

Como prueba complementaria a las estimaciones anteriores, consideramos de interés la realización de un contraste de hipótesis que se ajusta a los objetivos del presente estudio. Así podemos considerar como hipótesis la acotación de fechas reales de construcción de la rueda, que sólo puede abordarse como una acotación *post quem*, es decir, determinando la fecha que antecede a la data real de construcción de la rueda fijando para ello un nivel de significación aceptable ($\alpha=5\%$). Para realizar esta prueba nos apoyaremos en el *método de intercepción*, que está implementado en el programa *Calib4.4* (STUIVER Y REIMER, 1998) y sus resultados se incluirán en el apartado de interpretación.

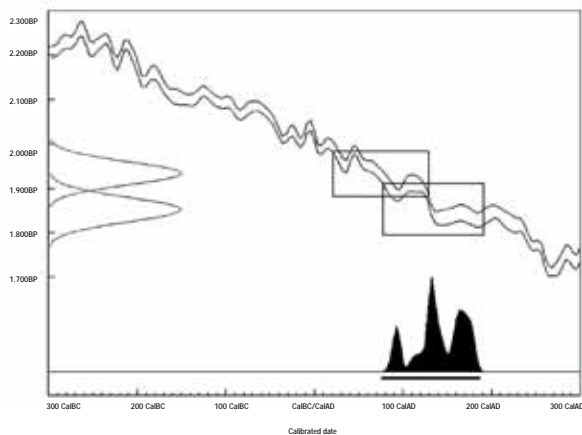
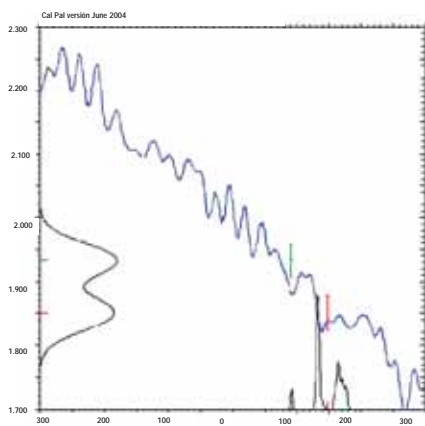
Finalmente, debemos valorar la posibilidad de que mediante nuevos muestreos del mismo material puedan lograrse resultados más precisos. A la vista de los resultados precedentes, el refuerzo de muestreo debería hacerse sobre la pieza 138 en un punto intermedio entre los dos ya muestreados.

Interpretación arqueológica

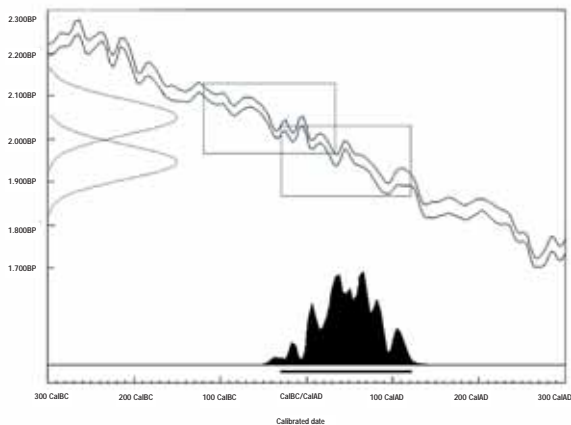
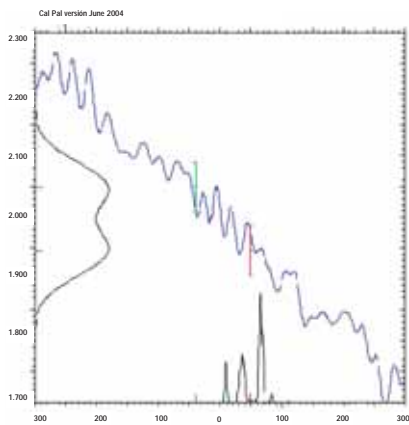
En la *rota* se han diferenciado 3 *unidades lignicas*, es decir, 3 agrupamientos de piezas en razón de su mismo origen espacio/temporal, que corresponden a las estructuras siguientes: discos centrales, tablas y tabicas de los cangilones. En su elaboración se utilizó, respectivamente, madera de pino negral, pino silvestre/laricio y abeto sp. Por otro lado, las 3 piezas sueltas estudiadas constituyen



10. Calibraciones de las medidas carbono-14 de la tabica del cangilón 22 obtenidas por el método I (izquierda) y el método II (derecha)



11. Calibraciones de las medidas carbono-14 de la pieza 138 obtenidas por el método I (izquierda) y el método II (derecha)



12. Calibraciones de las medidas carbono-14 de los discos DD y DT de la rota obtenidas por el método I (izquierda) y el método II (derecha)

en su conjunto una única *unidad lignica* dado que las piezas 138(6584) y 5491-A fueron extraídas del mismo árbol y la 5491-1 lo fue de otro árbol próximo. No se han encontrado caracteres anatómicos (bordes de gema o duramen) que indiquen el número de anillos que pueda faltar en las secuencias, y sólo podemos considerar algunos caracteres del despiece. Todas las piezas que integran los discos han sido cortadas con dos radios desiguales, que parece obedecer a la lógica del máximo aprovechamiento del tronco, por lo que cabe esperar que se hayan perdido pocos anillos, especialmente en el caso del árbol del que se extrajeron las piezas mayores de los discos DD y DT.

El paso de los resultados carbono-14 a edades arqueológicas se muestra en la figura 13. La datación de cada *unidad lignica* está referida al último anillo conservado de cada secuencia, que al no estar completas debemos considerar como datación *post quem*. Tal como se indicaba más arriba, los dos métodos de calibración proporcionan resultados convergentes en todos los casos, si bien la precisión es desigual y así los intervalos más pequeños se obtienen en piezas diferentes. En la parte superior de la figura 13, se incluyen las dataciones más precisas; sobre el cangilón 22 de la *rota*, por método II (OxCal), 100-210 cal AD *post quem* (figura 13A); y sobre la pieza 138, por el método I (GaussWM), 114-169 cal AD *post quem* (figura 13B), con sólo 55 años de amplitud y una estimación puntual en el año 137 cal AD *post quem*.

En estos resultados no se incluyen distintas fuentes de error experimental, por lo que se han corregido con un factor de error global del $\pm 2\%$, que incluye también el posible error de desviación debido al laboratorio. En la parte inferior de la figura 13 se muestran, en rojo y azul, los nuevos intervalos a considerar a partir de las anteriores medidas. Es interesante resaltar que el efecto de este error dista de ser simétrico, siendo casi 3 veces mayor hacia edades más modernas, de modo que las mejores estimaciones son: para el cangilón 22 de la *rota*, 80-270 cal AD *post quem*; y para la pieza 138(6584), 28-195 cal AD *post quem*.

Facies de aprovechamiento

Hemos constatado un aprovechamiento exhaustivo del material, a la vista de los despieces y la extracción de múltiples piezas de un único árbol. Así mismo, en el caso que nos ocupa, la madera fue labrada en estado de máxima humedad para igualar las condiciones en que iba a trabajar la rueda, lo que hace más lógico utilizar madera

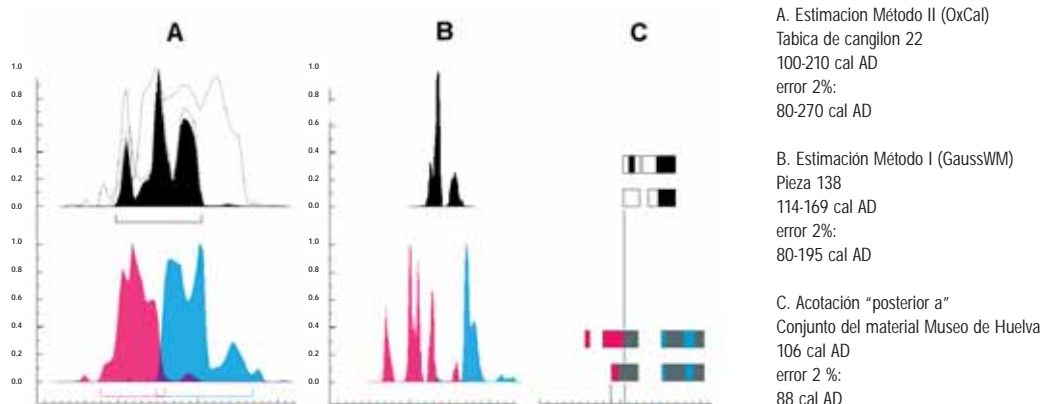
verde, sin fendas y más fácil de trabajar. Por tanto, debemos considerar que probablemente la madera no fue reutilizada y que las dataciones de la tala de árboles y de construcción de la rueda son *de facto* coincidentes.

Si tenemos en cuenta la distribución actual de especies, el balance entre maderas autóctonas y alóctonas en el material de Riotinto es de sólo 3 especies autóctonas (pino negral, roble y fresno) frente a 4 alóctonas (pino silvestre/laricio, abeto, haya y alerce), además del posible origen también alóctono de las 3 primeras. Se plantea, por tanto, como primera hipótesis, que estas maderas fuesen importadas dadas sus cualidades mecánicas y/o debido a la escasez de madera en la zona; pero es plausible también que las ruedas fuesen construidas en un taller ubicado fuera de la Península Ibérica y luego transportadas hasta la cuenca minera. En este sentido operan, de un lado, las posibilidades de aprovechamiento de maderas en la propia zona, y de otro, los inconvenientes del transporte de madera a largas distancias. En el caso que nos ocupa, tanto la madera en rollo como las piezas manufacturadas de la rueda deberían ser posteriormente rehumedecidas para elaborar las piezas y/o proceder a su montaje.

Facies de construcción

La unidad constructiva de la *rota* es manifiesta a la vista de la regularidad de los despieces, la selección de especies de madera, etc. Sin embargo, el estudio dendrocronológico ha demostrado “en detalle” esta unidad a partir de las distintas secuencias del proceso constructivo: los pares de piezas de los discos proceden del mismo árbol, por lo que se labraron y ensamblaron al mismo tiempo; un grupo mayoritario de tablas de cangilones se extrajo de un escaso número de troncos; la totalidad de tablas de cangilones se obtuvo de sólo 3 largos tablones. Por otro lado, las 3 piezas sueltas de discos formaron parte de 1 a 3 ruedas distintas. Es posible que las piezas 138 y 491, que proceden del mismo árbol, formaran parte de los discos gemelos de una misma rueda e incluso que la pieza 5491-1, muy fracturada, estuviese unida a la 5491-A, con lo que estas piezas pertenecerían a 1 ó 2 ruedas.

El periodo de actividad de la *rota* no fue corto a la vista del acusado desgaste producido en sus componentes por el agua cargada de arenas y sales minerales. El propio diseño de la rueda permitía su desmontaje parcial para efectuar reparaciones, pero no se ha detectado ninguna sustitución en su estructura asociable a su periodo de uso, por



13. Resultados de la datación carbono-14 en edades arqueológicas de la rota (A) y de la pieza 138 (B). Acotación "posterior a" (C) para todo el material del Museo de Huelva

lo que la originalidad de la *rota* puede considerarse total. La única sustitución de piezas digna de mención se produce tras su recuperación al reemplazar las dos tapas de sus discos por otras iguales tomadas de otra rueda, tal vez la que haría pareja con la recuperada. Otras sustituciones menores y reparaciones efectuadas para el remontaje de la rueda son descritas en el capítulo IV de este libro.

El examen de autenticidad de los fragmentos de radios hallados junto con las piezas 138 y 491 tiene interés especial por el interrogante que plantea sobre el origen geográfico de estas maderas. En el caso de los dos radios de abeto, al estar alojados en sus mortajas, permite aceptar su autenticidad, que es además concordante con el uso de esta misma especie en los radios de la *rota*. Sin embargo, el fragmento de alerce ha sido encontrado suelto, sin estar inserto en una mortaja de la pieza 138 y, si se trata-se de un radio de la misma rueda, ésta tendría radios mixtos de abeto y alerce. Su datación carbono-14 (12 BC - 168 AD) ha confirmado la originalidad de la madera de alerce, que procede de fuera de la Península Ibérica.

Facies de contexto y tipologías

Debemos partir de un desconocimiento del contexto de los restos de ruedas de Riotinto, más allá de las hipótesis realizadas sobre su procedencia de uno u otro filón. Tal como indicábamos, no tenemos seguridad de la ubicación precisa de cada ejemplar, por lo que es aventurado sostener que la rueda y las piezas sueltas del Museo de Huelva formaron parte de una misma cadena de desagüe y deducir de ello su contemporaneidad; como tampoco podemos suponer que se encontraban juntas las piezas sueltas y el ejemplar del British Museum de Londres, tal como ha propuesto Weisgerber (1979). Sin embargo, la

hipótesis de contemporaneidad entre piezas sueltas y *rota* es plausible sobre la base de la alta similitud tipológica que se produce en el uso de las mismas maderas, en el trazado general y en la ejecución de numerosos detalles.

Si aceptamos esta hipótesis de unidad cronológica para todo el material del Museo de Huelva, es oportuno ensayar el contraste *posterior a* sobre todas las recombinaciones de medidas carbono-14, a cuyo valor calibrado deberá añadirse el término "años a sumar" más pequeño de cada grupo. En la figura 13C (superior) se muestra el mejor resultado obtenido aplicando el *método de interceptación* (programa Calib4.4) que da la fecha 106 cal AD, tanto para la muestra aislada E211001C como para el grupo E211001C + E211101B. Si consideramos además un error adicional del 2%, se obtiene finalmente una acotación *posterior a* 88 cal AD (muestra E211001C, figura 13C inferior) para la construcción del conjunto de ruedas de Riotinto conservadas en el Museo de Huelva.

Al comparar las distintas *rotas*, se produce siempre un balance ambiguo entre caracteres convergentes y divergentes, tal como hemos expuesto en el tercer apartado. Según Domergue y Bordes (2004), hay que diferenciar sólo dos tamaños de ruedas: uno grande de 4,60 m, que era el habitual, y otro más pequeño de 3,60 m, necesario para adaptarse a ciertos desniveles, tal como se ha documentado en São Domingos. La mayoría de los ejemplares conservados tiene aproximadamente este diámetro y una longitud media de cangilón de 49-50 cm. La interpretación más lógica es considerar que son variaciones inherentes a las reglas de trazado que no parece estar prefijado el número de radios que, en consecuencia, oscilará dependiendo de las medidas anteriores.

A partir de esta interpretación podemos deducir que las variaciones en tamaño y número de radios no guardan relación con los distintos emplazamientos de las ruedas y que obedecen a simples variantes debidas al operario o al taller. Por tanto, no encontramos base suficiente para postular una evolución cronotipología, y la falta de dataciones empíricas de todos los ejemplares nos impide avanzar más en la cronología conjunta de las *rotae*. Sólo a partir de estos resultados se podría confirmar la unidad del momento de construcción de las ruedas o la existencia de desfases cronológicos pese a la aparente homogeneidad del diseño constructivo.

Finalmente, la presencia de especies alóctonas en el material de Riotinto plantea la cuestión del posible emplazamiento de los talleres de construcción. La gran similitud tipológica de las ruedas nos indica que fueron construidas en uno o varios talleres próximos entre sí. Sería interesante conocer, por tanto, todas las especies de madera que se han utilizado en las ruedas para así completar el balance general entre especies autóctonas y alóctonas. A la espera de completar esta información, podemos considerar que hasta el momento las especies identificadas en las otras ruedas tienen, o han tenido hace 2000 años, una presencia natural en zonas próximas a la cuenca minera, lo que pone en duda la necesidad de importar ciertas maderas por razones de escasez o calidad constructiva. Asimismo, si las dataciones empíricas de todos los fragmentos conservados indican un mismo momento constructivo, se reforzaría la hipótesis de importación de ruedas desmontadas.

Conclusiones

La *rota* del Museo de Huelva fue diseñada diferenciando dos subestructuras, circular y radial, que fueron construidas eligiendo tres especies distintas en función de la solicitud mecánica de cada pieza. Se utilizó pino negral para elaborar el cubo, que era la parte más sólida de la rueda, el pino silvestre/laricio para la tablazón que conforma el anillo de cangilones, y la madera de abeto para el conjunto de piezas dispuestas en dirección radial que enlazan los dos componentes anteriores.

El estudio dendrocronológico de las maderas citadas ha permitido establecer 3 *unidades lignicas* integradas por piezas de un mismo origen y que fueron elaboradas al mismo tiempo. Así se ha demostrado la unidad constructiva de la *rota* que conserva su integridad original.

Únicamente se ha detectado que las dos tapas de discos pertenecieron realmente a otra rueda idéntica, probablemente la rueda gemela con la que formaría pareja. Las alteraciones del montaje actual de la rueda se reducen sólo a algunas sustituciones y cambios de posición de piezas aisladas.

Las 3 piezas sueltas conservadas en el Museo de Huelva pertenecen a discos de ruedas de 27 radios y forman entre sí una sola *unidad lignica* que indica que son coetáneas y tienen un origen común. De su constitución se deduce que probablemente formaron parte de 1 ó 2 ruedas. Sobre la base de la alta similitud tipológica entre estas piezas y la *rota*, se postula que son coetáneas y fueron construidas en el mismo taller.

A partir del material estudiado se han elaborado varias series dendrocronológicas: E211006S-7S de pino negral con 100 y 299 años; E211014S de pino silvestre/laricio con 116 años; E211003S-4S-5S de *Abies* sp con 106, 97 y 91 años, y E211103S de *Pinus* sp. con 143 años. Se ha realizado la datación carbono-14 (método I, 99%) de las cronologías E2110007S: 66–145 cal AD; E211001S: 111–206 cal AD; y E211103S: 114–169 cal AD.

Los anteriores resultados han servido para estimar la datación arqueológica de la *rota* en 100–210 cal AD *post quem* y de las piezas sueltas en 114–169 cal AD *post quem*. La consideración de un error instrumental de $\pm 2\%$ permite una datación más realista para la *rota* en 80–270 cal AD *post quem* y para las piezas sueltas en 28–195 cal AD *post quem*. Aceptando la contemporaneidad de ambos restos, y tomando un error del 2% y una significación del 5%, se obtiene la acotación de edad de todos los restos *posterior a* 88 cal AD.

Se ha evaluado el proceso constructivo del despiece, labra y armado de los elementos integrantes de la *rota* y se ha verificado que siguieron una reglas perfectamente establecidas que coinciden con las aplicadas en las otras ruedas conservadas: la rueda de Riotinto del British Museum de Londres, la rueda de Tharsis del Museo de Glasgow y la rueda de São Domingos del Musée des arts et métiers de París.

No se han encontrado diferencias tipológicas entre las *rotae* indicadas que pudieran significar desfases cronológicos entre las mismas. Sólo a partir de una datación empírica de todas ellas se podrá determinar si fueron construidas en un corto periodo de tiempo o si, por el

contrario, pertenecen a momentos diferenciados pero manteniendo el mismo diseño.

La hipótesis de construcción del conjunto de *rotae* en un único taller o en varios no ha podido ser dilucidada sobre la base de las convergencias/divergencias constructivas de las ruedas. La hipótesis de que dicho taller estuviese situado fuera de la Península Ibérica tiene su

principal fundamento en el uso de varias especies de madera alóctonas que han sido identificadas en el material de Riotinto que se conserva en el Museo de Huelva.

Notas

¹ Las identificaciones taxonómicas y de fibras han sido realizadas por María Teresa López de Roma y José Luis Simón Serfaty, especialistas del INIA.

Bibliografía

AITKEN, M.J. (1990) *Science-based dating in archaeology*. London: Longman, 1990

BAUER, E. (1980) *Los montes de España en la Historia*. Madrid: Servicio de Publicaciones Agrarias, D.L. 1980

BOON, G. Y WILLIAMS, C. (1966) The Dolaucothi Drainage Wheel. *Journal of Roman Studies*, 56 pp. 122-127

BLANCO FREIJEIRO, A. y LUZÓN, J.M. (1966) Mineros antiguos españoles. *Archivo Español de Arqueología*, 39, 113-114, pp. 73-89

BRONK RAMSEY, C. (1998) Probability and dating. *Radiocarbon*, 40 (1), pp. 461-474

BRONK RAMSEY, C.; VAN DER PLICHT; WENINGER, B. (2001) "Wiggle matching" radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 43, 2A, pp. 381-389

BUCK, C.E.; LITTON, C.D.; SMITH, A.M.F. (1992) Calibration of radiocarbon dates pertaining to related archaeological events. *Journal of Archaeological Science*, 19, pp. 497-512

BURNHAM, B.C. (1997) Roman Mining at Dolaucothi: the implications of the 1991-3 excavations near Carreg Pumsaint. *Britannia*, XXVIII, pp. 323-336

CARLE, M.C. (1976) El bosque en la Edad Media (Asturias-León-Castilla). *Cuadernos de Historia de España*, 49-50, pp. 297-374

DOMERGUE, C. (1987) Catalogue des mines et des fonderies antiques de la Péninsule Ibérique. Publications de la Casa de Velázquez. Serie Arceologie VIII, tomo I

DOMERGUE, C.; BORDES, J.L.; BINET, CH. (1999) La roue de S. Domingos. Musée des Arts et Métiers. *La Revue*, pp. 49-59

DOMERGUE, C.; BORDES, J.L.; (2004) La roue élévatrice de la mine romaine de Tharsis (Huelva, Espagne). Etude archéologique et technique de ce type de roue. En : F. Minanzio (Ed.): Problemi di macchinismo in ambito romano. Macchine idrauliche nella letteratura tecnica nelle fonti giornata di studio sveltasi a Como,

presso il Museo Civico "Paolo Giovio", il 26 gennaio 2002. Como, pp. 87-105

GIL SÁNCHEZ, L. (1995) Los pinares de Fuencaliente (Ciudad Real). *Montes*, 39, p. 94

GÓMEZ CRUZ, M. (1992) *Atlas Histórico-Forestal de Andalucía. Siglo XVIII*. Granada: Universidad, 1992

GONZÁLEZ GÓMEZ, A. (1977) *Moguer en la Baja Edad Media (1248-1538)*. Huelva: Diputación Provincial, 1977

GONZALO y TARIN, J. (1888) Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España. Descripción física, geológica y minera de la provincia de Huelva. Madrid: IGME, Ministerio de Industria y Energía, tomo II, 1886-1888

LADERO QUESADA, M.A. (1992) *Niebla de reino a condado. Noticias sobre el Algarve andaluz en la Baja Edad Media*. Huelva: Diputación Provincial, 1992

LIROLA DELGADO, J. (1993) *El poder naval de Al-Andalus en la época del Califato Omeya*. Almería: Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación Provincia, 1993

LOMBARD, M. (1959) Un problème cartographique. Le bois dans la Méditerranée musulmane (VII-XI siècles). *Annales E.S.C.*, 14, pp. 234-254

LUZÓN NOGUÉ, J.M. (1970) Instrumentos mineros de la España Antigua. VI Congreso Internacional de minería. Tomo I. León, pp. 221-258

LUZÓN, J.M. (1975) La Romanización. *Huelva, Prehistoria y Antigüedad*. Madrid

MARTÍNEZ ATIENZA, F. (1999) Bibliografía (1945-1998) paleopolínica del Holoceno Ibérico. *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural* (Sec. Biol.), 95 (1-2), pp. 5-30

MONTEAGUDO SÁNCHEZ DE MORELLÁN, F.J.; RODRÍGUEZ MARZAL, J.L. (1991) Vegetación. *Memoria del Mapa Forestal de España*. Hoja 3-10, pp. 56-92

NASH, W.G. (1904) *The Rio Tinto Mine. Its history and romance*. London: Simkin Marshall Hamilton Kent & Co. Ltd., 1904

OREJAS SACO DEL VALLE, A. (2001) Aspectos técnicos y organización del trabajo en la Lex Metallii Vipascensis. Artífex. En: *Ingeniería romana en España*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. pp. 255-272

PALMER, R.E. (1926/1927) Notes on some Ancient Mine Equipments and Systems. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 36, pp. 299-336

PÉREZ MACÍAS, J.A. (1998) *La producción de los metales en el cinturón ibérico de piritas en la prehistoria y la antigüedad*. Huelva: Universidad, 1998

POZO BLÁQUEZ, F.; CAMPOS CARRASCO, J.M.; BORJA BARRERA, F. (1996) *Puerto histórico y castillo en Palos de la Frontera (Huelva). Asentamiento humano y medio natural*. Huelva: Universidad, 1996

SANTIAGO, R. (1994) Vegetación. *Memoria del Mapa Forestal de España*. Hoja 3-9, pp. 57-102

STUIVER, M.; REIMER, P.J.; BARD, E.; BECK, J.W.; BURR, G.S.; HUGHEN, K.A.; KROMER, B.; MCCORMAC, G.; VAN DER PLICHT, J.; SPURK, M. (1998) INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40(3), pp. 1041-1083

STUIVER, M.; REIMER, P. (1998) CALIB Versión 4.0 URL. <http://depts.washington.edu/qil/>

RHOTENBERG, B.; GARCÍA, F.; BACHMANN, M.G.; GOETHE, J. (1990) The Rio Tinto enigma. Minería y Metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas, I. Madrid

WEISGERBER, G. (1979) Das römische Wasserhebezeug aus Rio Tinto in Spanien im British Museum London. *Der Anschnitt*, 31, pp. 62-80

WENINGER, B. (1997) Monte Carlo wiggle matching. Zur statistischen Auswertung der Mittelneolithischen 14C-daten von Hasselsweiler 2, Inden 3, and Inden 1. En: Biermann E., editor: Grobgartach und Oberlauterbach. Interregionale Beziehungen im süddeutschen Mittelneolithikum. Archäologische Berichte, 8, pp. 91-113