

Nuevas consideraciones sobre el acueducto romano de Almuñécar

Elena H. Sánchez López
Jenny Pérez Marrero
Margarita Orfila Pons
Isabel Bestué Cardiel

Tras la batalla acaecida en Munda en el 45 a.C., César premió a las ciudades que le habían sido fieles concediéndoles el status de *municipium civium romanorum*; entre las afortunadas se encontraba Almuñécar, la antigua *Sexs* y a partir de ahora *Municipium Sexi Firmum Iulium*. Es en este momento en el que parece iniciarse en la ciudad, según todos los autores, una ferviente actividad constructora en la que hay que enmarcar el acueducto, destinado posiblemente no sólo a abastecer a la floreciente industria de producción de salazones, sino también a permitir el desarrollo de la ciudad en el modo en el que era entendido por los romanos, incluyendo edificios como las termas, además de fuentes y jardines.

En cuanto al acueducto romano de *Sexi* podemos decir que ha sido objeto de varias investigaciones desde el punto de vista histórico, en donde se han planteado diversas hipótesis de su trazado que han podido ser verificadas sólo en parte de la conducción, fundamentadas en el reconocimiento de algunos de sus restos arqueológicos. El presente trabajo tiene como objetivo realizar un nuevo reconocimiento del antiguo acueducto en campo, haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica para el registro y análisis de los datos, que junto con un estudio hidráulico nos permita realizar nuevas aportaciones sobre el sistema de abastecimiento de agua a la ciudad.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CONDUCCIÓN

El acueducto romano de *Sexi* contó con una longitud de 7 km aproximadamente desde el sitio conocido como las Angosturas, punto final de la captación, hasta los depósitos terminales en la ciudad.¹ El agua transportada provenía del acuífero del río Verde y era recogida a través de una galería de infiltración que afloraba a la superficie en el sitio conocido como la Fuente de los Granados. Al finalizar la galería de captación subválvea, el agua era conducida a la ciudad por canales abovedados que operaban en régimen de lámina libre siguiendo las curvas de nivel del terreno, algunas veces casi superficial y otras enterrada a unos cuantos metros. Se hizo uso de dispositivos especiales tipo *subtrucciones* y *arcuaciones* para salvar depresiones cuando se consideró necesario, cuatro de estos últimos han sido estudiados en detalle por su monumentalidad. También se sabe que contó con un túnel que permitía el paso de la canalización de la cuenca del río Verde y a la del río Seco. La parte final de la conducción terminaba con un sifón invertido de 1 km de longitud realizado con tubos cerámicos y que posiblemente tenía un dispositivo de rotura de presión *columnaria* en su parte final. Parte de la antigua canalización ha seguido en funcionamiento hasta nuestros días como acequia para el riego de la rica vega sexitana, razón que explica la conservación de gran parte de sus elementos extraur-

banos y que lo convierte en el acueducto romano mejor conservado de Andalucía.

EL TRAZADO DEL ACUEDUCTO ROMANO DE ALMUÑÉCAR EN LA DOCUMENTACIÓN

El primer estudio realizado sobre el trazado del acueducto es obra del ingeniero Carlos Fernández Casado, quien publicó en 1949 en el *Archivo Español de Arqueología* un artículo en el que describía y analizaba los restos conservados del mismo, apuntando ya la necesaria existencia de un sistema de sifón inverso para permitir que el agua salvara la vaguada que se extiende a los pies de las colinas sobre las cuales se asentó Almuñécar en época antigua.

Una segunda propuesta fue la presentada por Antonio Tovar Sabio y Tomás Camero Uclés como Proyecto de Fin de Carrera en la década de los 80, bajo el título «Conducción romana de Sexi», donde se describen los restos conservados en ese momento del acueducto.

En el año 2000 vio la luz el último estudio sobre la conducción con una nueva propuesta de trazado, obra de Federico Molina Fajardo, arqueólogo municipal de Almuñécar durante dos décadas, y que recogió en su análisis los datos arrojados por las excavaciones llevadas a cabo en el municipio. Como nueva aportación se encuentra la excavación llevada a cabo en lo que tanto Torres Balbás como Fernández Casado identificaron con el *castellum aquae*, los restos conocidos como Cueva de los Siete Palacios; hipótesis que descartó al no aparecer rastro alguno de mortero hidráulico en la construcción. También describe los restos arqueológicos exhumados en las diferentes campañas de excavación realizadas en la zona de La Carrera, concretamente el *venter* del sifón, cuya existencia ya se apuntara en los cuarenta.

NUEVO RECONOCIMIENTO DE LOS RESTOS ARQUEOLÓGICOS, USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El nuevo trabajo de reconocimiento de los restos arqueológicos partió de la revisión de estudios anteriores, para lo que se realizó la digitalización de las hipótesis de trazado planteadas y su posterior georeferenciación a través del SIG, elaborándose un plano

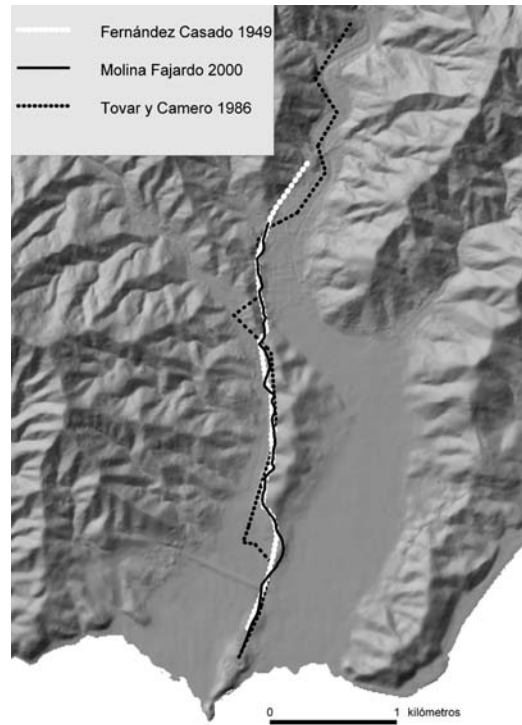


Figura 1
Plano donde se muestran las hipótesis de trazado planteadas por trabajos anteriores

donde se pueden evaluar en forma conjunta. Las hipótesis de trazado georeferenciadas han sido las de Fernández Casado (Fernández 1949), la de Tovar y Camero (Tovar y Camero 1986) y la de Molina Fajardo (Molina 2000).

A partir del análisis de la información anterior se inició la campaña de reconocimiento en campo de los restos arqueológicos documentados, así como nuevos restos que no habían sido registrados con anterioridad. El trabajo de campo permitió la ubicación geográfica de cada elemento a través de las coordenadas UTM² y la evaluación de todas sus características.

Toda la información fue gestionada a través de un Sistema de Información Geográfica, específicamente se trabajó con el programa Arcview 3.2 con cartografía base de los mapas topográficos de Andalucía escalas 1:2000 y 1:10000 de la provincia de Granada

del Instituto de Cartografía de Andalucía con sus correspondientes modelos digitales del terreno.³

El resultado de este trabajo es el registro de toda la información en una base de datos asociada a una cartografía georeferenciada actualizada, que servirá como punto de partida para los análisis posteriores, como las hipótesis de trazado o el estudio hidráulico.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN. (DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA NUEVA CAMPAÑA EN CUANTO AL RECONOCIMIENTO POR TRAMOS)

Las tareas de reconocimiento de campo llevadas a cabo en el último año han dado como resultado un total de 48 puntos inventariados y georeferenciados,

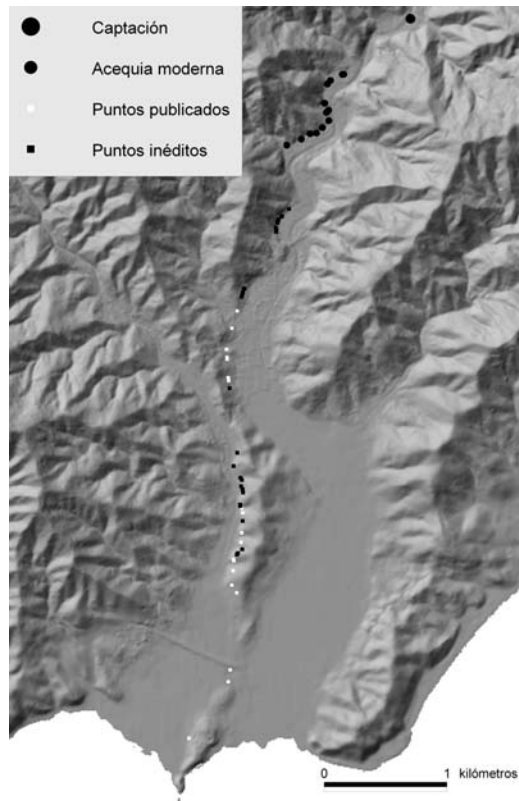


Figura 2
Mapa con restos arqueológicos ya publicados e inéditos

algunos de ellos inéditos, que para facilitar su mejor análisis han sido organizados en un total de cinco tramos que pasamos a describir someramente.

Primer tramo

Corresponde a la galería de captación del acueducto (Molina 2000), cuyo punto final se localiza en la conocida como Fuente de Los Granados, siendo sin embargo discutido su punto inicial, como veremos más adelante.

Segundo tramo

Desde la dicha Fuente de Los Granados, el agua pasa a discurrir en régimen de lámina libre por una acequia de nueva construcción que suponemos reutiliza, al menos en parte, el trazado del acueducto de época romana.

Tercer tramo

El canal de factura romana aparece, a lo largo de unos 200 m, en las cercanías de la finca de «Los Fonnollá», coincidiendo con el inicio de un sector excavado en la roca de unos 30 m de longitud. A lo largo de este primer sector, el canal abovedado muestra 0,40 m de anchura en la base y una altura variable entre 0,80 y 1,00 m medidos desde la solera hasta el intradós de la bóveda.

Ya en la barriada de Torrecuevas se localiza el siguiente resto de *specus*, descubierto gracias a una excavación arqueológica llevada a cabo en junio de 2008 en un sitio conocido como El Convento;⁴ un tramo de 75 m de canal abovedado de 1,00 m de altura interna y entre 0,36 y 0,40 m de anchura en la base.

Tras cruzar la Carretera del Suspiro del Moro, el canal aparece elevado sobre el denominado Acueducto de Torrecuevas, *arcuatio* de 130 m de longitud (Molina 2000, 93). A partir de esta construcción, la conducción discurre soterrada a través de tierras de cultivo y bajo edificaciones de reciente construcción a lo largo de casi todo su recorrido hasta el cambio de cuenca, apareciendo de forma puntual sobre un arco posiblemente reconstruido (Molina 2000); un

tramo de unos 20 m en las cercanías del Centro de Salud; elevado sobre una obra de cuatro arcos en terrenos de Juan Salado (Fernández 1949, 321; Molina 2000) y una *spiramina* de 4 m de profundidad.

Cuarto tramo

Aproximadamente a 500 m en línea recta de ese último punto, vuelve a aparecer el canal del acueducto, ya en la cuenca del río Seco; cambio de vega para el cual se debió recurrir al empleo de un túnel. Todos los estudios previos sobre el acueducto lo sitúan aproximadamente en la misma zona, coincidiendo con el estrechamiento de la formación montañosa que separa los cauces de ambos ríos; aunque su localización exacta difiere en todos ellos. Fernández Casado (1949, 318) nos da además el dato de su longitud, unos 350 m; y Tovar y Cabrero (1986, 60) describen el canal, de roca sin revestir de 1,70 m de altura y 0,70 m de ancho.

Transcurridos unos 200 m desde este primer punto, el canal aparece visible, generalmente como apoyo para la formación de terrazas de cultivo, a lo largo de casi todo su recorrido hasta el Acueducto III, ubicado en la finca del Cercado de la Santa Cruz.⁵ En este tramo han sido localizados, además de las tres monumentales construcciones sobre arcos, cuatro desarenadores de planta cuadrangular y un total de siete registros circulares, además de los dos localizados entre la última *arcuatio* y la posible ubicación del depósito de cabecera del sifón.

En su recorrido a lo largo de la cuenca de río Seco, las dimensiones del canal oscilan entre los 0,30 a los 0,45 m de anchura en la base, y 0,90 a 1,05 m de altura hasta el intradós de la bóveda.

Quinto tramo

Corresponde al sistema de sifón inverso que se empleó para llevar el agua hasta la ciudad, situada en el Cerro de San Cristóbal. De este sistema el único elemento visible en la actualidad lo constituyen los diecisiete arcos excavados en la zona de La Carrera (Molina 2000, 103–4), construidos como parte del *venter* y destinados a sostener el canal que contenía la canalización cerámica a presión. Restos de esta tubería de piezas de cerámica fueron hallados por Mo-

lina Fajardo (2000, 102), quien proporciona datos de sus dimensiones: 0,34 m de largo, con 0,20 m de diámetro exterior y 0,16 m de diámetro interior, que estaba dispuesta dentro de un canal, que en el tramo mejor conservado medía 1,60 m de alto y 0,70 m de ancho.

CONSIDERACIONES DE TIPO HIDRÁULICO

En el presente trabajo se realizó un avance del cálculo de las capacidades hidráulicas de los diferentes tipos de conducciones en conjunto con un estudio de la aportación de la fuente de captación.

La captación, ubicación y características generales

El caudal de agua transportado por el acueducto depende por una parte de la capacidad de aportación de la fuente y por otro de las características de sus conducciones operando como un sistema conjunto, por lo cual el estudio hidráulico se inicia por una revisión de la captación en cuanto a su capacidad de aportación.

Todos los autores que han tratado el tema del acueducto romano de *Sexi* coinciden en que la captación se encontraba en: «el río Verde de Almuñécar,

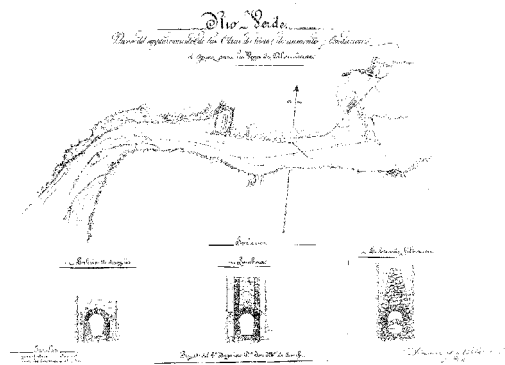


Figura 3
Plano de ubicación de las galerías de infiltración y drenaje en el río Verde, Las Angosturas, realizado por D. José María de Sancha en 1875

en la zona denominada las Angosturas» (Fernández [1972] 2008, 190). Una captación tipo galería de infiltración dentro del acuífero aluvial del río Verde.

Hasta la fecha son conocidos dos reconocimientos de esta galería subterránea, el primero realizado en 1875, y el segundo en 1982.

Producto del reconocimiento de 1875 fue el proyecto de rehabilitación encargado al ingeniero D. José María de Sancha del que forma parte el plano adjunto, que nos permite conocer el trazado de las conducciones en este tramo, las características internas de las galerías y el número de lumbreras.

El segundo reconocimiento fue el realizado por D. José Rodríguez Rodríguez y D. Rafael Rodríguez Vigo en 1982 como parte de unos trabajos de limpieza y que conocemos a través de las descripciones hechas por Federico Molina Fajardo (Molina 2000, 87-90), quienes describen que la antigua captación romana es una obra subterránea, ubicada cerca del pueblo de Jete. El largo de la conducción la establece en 500 m a la altura del barranco Borbona y que finaliza a la altura del monumento de la Virgen del Agua. Sitúan la galería de infiltración a 3 m por debajo del lecho del río, una estructura tipo canal abovedado de 1,10 m de alto y 0,50 m de ancho realizado en pizarra y cantos de ríos sin mortero de unión y con un revestimiento interior únicamente en la solera y los hastiales hasta una altura de 45 cm.

En el verano de 1992, con motivo de unas obras de contención en el río, fueron hallados posibles restos de la galería de captación aguas arriba de río Verde, lo que llevó a los informadores de dicho hallazgo a proponer que el inicio de la misma se encontraría en el Peñón Rodado, en las cercanías de Otivar (Yáñez et al. 1994).

En consecuencia, podemos concluir que el tipo de captación era galería de infiltración dentro del acuífero del río Verde, y que su parte final se ubicaba en el paraje de las Angosturas, pero lo que no queda claro es la situación del inicio de la misma, punto en el que los autores difieren de forma significativa.

La galería de las Angosturas, sobre su capacidad de aportación

Los caudales subterráneos captados por la galería de las Angosturas presentan actualmente una alta dispersión debida al carácter irregular de los aportes

pluviométricos en el tiempo en el acuífero del río Verde, así como por el incremento de las extracciones para el riego de la zona.

Los primeros aforos efectuados en la galería son de los años 60, en los que se llegaron a medir caudales de hasta 350 l/s (Benavente 2005, 114) en un rango entre los 200 a 400 l/s (Benavente 1985, 158). Son concretamente estos datos, equivalentes a 17.280 a 34.560 m³/día, los que hemos tomado en la realización de los cálculos, por considerarlos más cercanos a las condiciones originales de la captación, es decir a las de época romana.

Primeras estimaciones de la capacidad hidráulica de los tramos de canal

La capacidad hidráulica de los tramos de canal depende de la velocidad del flujo y de su sección hidráulica. A su vez la velocidad del agua está determinada por una serie de variables entre las que se encuentran: la pendiente longitudinal del canal y la rugosidad interna de la superficie en contacto con el agua. Para realizar el cálculo del caudal posiblemente transportado es necesario conocer todos estos valores y aplicar la formulación correspondiente.

Las fórmulas a aplicar parten de considerar un flujo de tipo uniforme, al que se aplican las ecuaciones más reducidas de continuidad y dinámica: $Q = v \cdot A$, donde: Q es el caudal, v es la velocidad media y A es la sección hidráulica transversal del flujo. Por otro lado tenemos que: $I_e = I_s$, donde: I_e es la pendiente de la línea de energía y I_s es la pendiente longitudinal de la conducción. Para el cálculo de la velocidad del agua se han empleado tanto la ecuación de Manning: $v = (Rh^{2/3} \cdot I_s^{1/2})/n$, donde: Rh es el radio hidráulico y n es el coeficiente de rugosidad de Manning; como la de Chézy: $v = C \cdot \sqrt{Rh \cdot I_s}$, donde v es la velocidad del flujo en m/s, C es un factor que depende de las características del canal, Rh es el radio hidráulico del canal y I_s es la pendiente longitudinal del canal. El factor C ó coeficiente de rugosidad de Bazin, se determina por la expresión: $C = 87 \cdot \sqrt{Rh} / (\gamma + \sqrt{Rh})$, donde γ es el coeficiente de rugosidad del canal.

La mayor dificultad de aplicar ecuaciones empíricas para el cálculo de la velocidad del flujo como las de Manning y de Chézy en el estudio de conducciones antiguas, se encuentra en la determinación del

coeficiente de rugosidad n ó γ a aplicar para cada tipo de conducción, ya que no existen estudios de rozamiento para este tipo de revestimiento interno. En investigaciones similares a la presente lo que se ha hecho es adoptar un valor de n ó γ por comparaciones con los revestimientos de conducciones modernas (Ventura 1993; Almagro 2002; Burdy 2002, 166; Aranda 2006, 31, Pérez y Bestué 2008).

En el presente trabajo se han adoptado dos valores extremos de rugosidad, obteniéndose un rango de caudales posibles en lugar de definir un valor puntual. Los valores de rugosidad adoptados en el presente ensayo son para la fórmula de Manning $n = [0,010 - 0,025]$ y para la de Chézy $\gamma = [0,16 \text{ y } 0,46]$.

En cuanto a las características geométricas de la conducción se ha trabajado con una sección promedio establecida a partir de los datos de los restos arqueológicos reconocidos en el campo. La sección es de forma rectangular cubierta con una bóveda de cañón, típica de las conducciones romanas, revestida interiormente con un mortero.⁶ En general podemos hablar de un ancho del canal en la base variable, con un mínimo de 0,36 m y máximo de 0,50 m con una altura también variable entre 0,90 m y 1,20 m medida desde la solera del canal hasta el intradós de la bóveda.

Para el cálculo de la capacidad hidráulica del canal también fue necesario conocer el valor medio de la pendiente longitudinal de la conducción. Como parte del presente trabajo se realizó una medición en el tramo del Convento, obteniéndose un valor de la pendiente de 1,20 m/km.

Otro dato conocido que permite establecer una primera hipótesis de pendiente media lo hemos extraído de las cotas de las cuatro estructuras superficiales del acueducto tipo *arcuationes* conocidas: el acueducto de Torrecuevas, Acueducto I, Acueducto II, y el Acueducto III. Desde la primera *arcuatio*, la de Torrecuevas hasta la última existe un desnivel aproximado de 2,5 m en una longitud de 2,2 km, lo que nos arroja una pendiente media aproximada de 1,1 m/km para este tramo de la conducción.

El último dato necesario para el cálculo del caudal transportado es la altura de la lámina de agua dentro de la canalización, que al ser desconocida o variable nos ha hecho plantear el análisis estableciendo distintos valores de profundidad de agua. Los resultados obtenidos pueden verse en el gráfico 1 anexo.

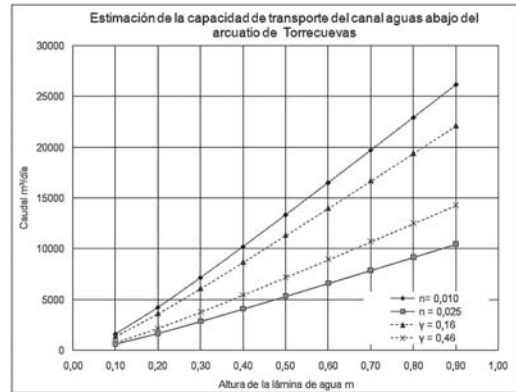


Gráfico 1
Velocidad y caudal transportado por el canal del acueducto romano de Almuñecar en función de la altura de la lámina de agua

Podemos concluir que el canal estaba en capacidad de transportar un caudal promedio de 17000 m³/día, similar al aportado por la fuente, que correspondería a una altura de la lámina de agua de 0,90. Estos valores deben ser ajustados a partir de la determinación experimental del coeficiente de rugosidad interna, ya que afecta de manera significativa los resultados en más de un 30%.

El sifón, características generales y primeras estimaciones de su capacidad hidráulica

Luego de evaluados los posibles caudales aportados por la fuente y la capacidad hidráulica de los tramos en canal, se ha estudiado la capacidad de transporte del último tramo de la conducción, conformado por un sifón que operó en régimen de tuberías a presión.

El estudio partió de la revisión de la documentación existente sobre esta parte de la conducción desde donde se han extraído los datos necesarios para los cálculos hidráulicos.

Este tramo del sistema lo conocemos por varios estudios (Fernández 1949; Molina 2000; González y Velázquez 2005), que establecieron diferentes hipótesis de trazado y que han sido plasmadas en la cartografía actualizada en donde se pueden evaluar de forma conjunta.

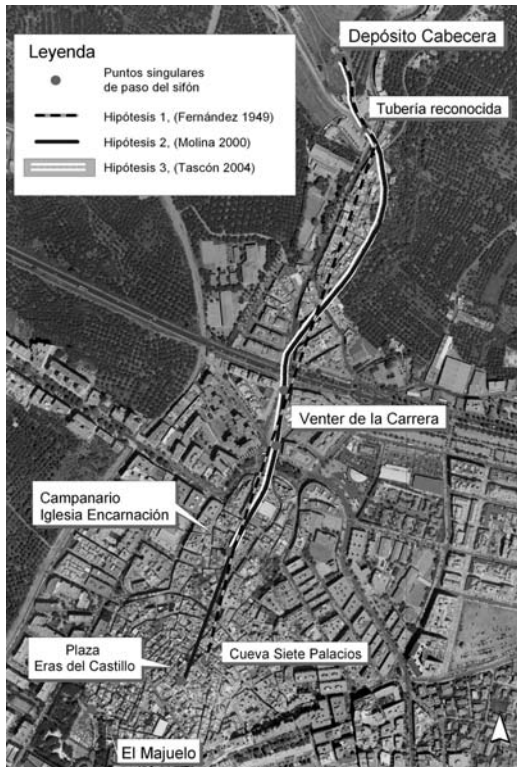


Figura 4
Conjunto de hipótesis del trazado del sifón planteadas por estudios anteriores

Todas las hipótesis coinciden en la ubicación del depósito de cabecera y difieren poco en el trazado en planta. Se puede decir que la de Molina (Molina, 2000) es la más ajustada, ya que tiene en cuenta las nuevas excavaciones desconocidas por Fernández Casado en 1949 (Fernández 1949). La diferencia más importante entre las tres propuestas está en la ubicación del depósito terminal, pues mientras dos de ellas lo ubican bien en la Cueva de los Siete Palacios (Fernández 1949) ó sobre la actual Plaza de Eras del Castillo (Molina 2000) ambas en la zona más alta de la ciudad, la última plantea su emplazamiento en la actual torre campanario de la iglesia de la Encarnación (González y Velázquez 2005) a una cota muy inferior en torno a unos 24 m.s.n.m.

Otros datos de interés para el estudio hidráulico son las características de los tubos que conformaron

la conducción, así como el tipo de junta empleada. Por Fernández Casado (Fernández 1949) sabemos que estaba conformada por tubos cerámicos de 15 cm de diámetro unida a «enchufe y cordón» con un mortero de cal extraordinariamente endurecido, dispuesta sobre la solera de una galería abovedada y junto al paramento izquierdo.

Del reconocimiento de la tubería hecho por Molina Fajardo se suministran más datos como lo son las dimensiones, «piezas de 34 cm de largo, por 20 cm de diámetro exterior y 16 cm de diámetro interior, que está fijada al fondo del canal por una obra de piedras pequeña trabadas con mortero de cal» (Molina 2000, 102).

Con los datos suministrados por las investigaciones anteriores se realizó una primera estimación de la capacidad de transporte del sifón para cada una de las tres hipótesis de trazado, asumiendo que el flujo operaba en régimen permanente de líquidos en tuberías a presión, que se caracteriza por una operación estable, al cual le son aplicables las ecuaciones de continuidad y movimiento siguientes: $Q = v \cdot A = \text{constante}$, donde: Q es el caudal, v la es la velocidad media y A es la sección hidráulica transversal del conducto y la ecuación de Bernuolli $H = (p/\gamma + z + v^2/2g)$, donde H representa la energía ó altura total de los elementos del líquido por unidad de peso del fluido referida a una sección de la tubería, p/γ representa la altura o energía de presión, z la cota o energía potencial y $v^2/2g$ la altura o energía cinemática (Méndez 1995, 2.11).

La estimación se ha realizado formulando un balance energético entre dos diferentes secciones del sistema de la conducción: la de entrada, que corresponde al depósito de cabecera y la de salida en el depósito terminal. En el presente estudio se han tenido en cuenta las pérdidas de energía por fricción en la tubería aplicando la fórmula de Manning: $i = (v^2 \cdot n^2) / Rh^{4/3}$, donde i es la pérdida de carga, v es la velocidad en m/sg, n^7 es el coeficiente de rugosidad de Manning y Rh es el radio hidráulico; las pérdidas localizadas se han estimado como un coeficiente K experimental asociado al término $v^2/2g$.

La complejidad del cálculo en este caso se encuentra en el desconocimiento de la ubicación de los depósitos terminales y su dispositivo de rotura de presión *columnaria*. Se han realizado unas primeras estimaciones para las tres diferentes ubicaciones de los depósitos terminales planteadas por trabajos ante-

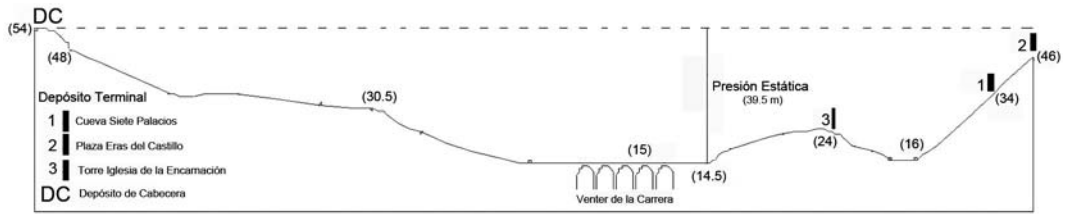


Figura 5 Perfil del sifón del acueducto de Almuñécar, en donde pueden verse las tres posibles ubicaciones de los depósitos terminales planteadas en estudios anteriores. Dibujo: Pérez 2009

Hipótesis	Longitud (m)	Cota depósito cabecera (m)	Cota depósito terminal (m)	Pérdida de carga (m)	Gradiente hidráulico (m/Km)	Rugosidad n=0.010		Rugosidad n=0.020	
						Velocidad del agua m/s	Caudal m ³ /día	Velocidad del agua m/s	Caudal m ³ /día
1	1100	54	34	20	18.18	1.57	2726.77	0.79	1368.23
2	1200	54	46	8	6.67	0.95	1651.79	0.48	828.58
3	900	54	24	30	33.33	2.12	3688.21	1.07	1852.10

Tabla 1 Posibles velocidades y caudales transportados por el sifón del acueducto romano de Almuñécar para diferentes hipótesis de trazado sin *columnaria*

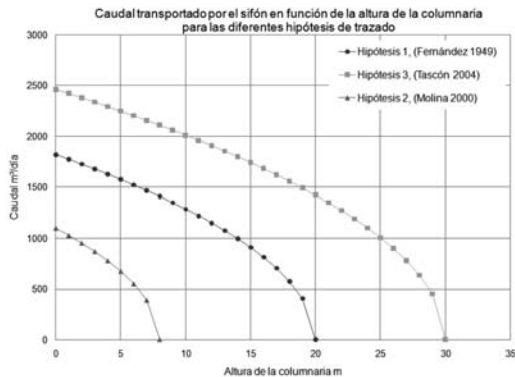


Gráfico 2 Relación entre el caudal posiblemente transportado por el sifón y la altura de la *columnaria* para las diferentes hipótesis de trazado

rios: 1. La Cueva de los Siete Palacios (Fernández 1949), 2. La plaza de Eras del Castillo (Molina 2000) y 3. La torre campanario de la iglesia de la Encarnación (González y Velázquez 2004) y para dos situa-

ciones diferentes: la primera situación parte de la condición de que no exista un dispositivo de rotura de presión *columnaria* y la segunda considera la presencia de este elemento.

En la tabla 1 pueden verse los resultados de los cálculos de la capacidad hidráulica del sifón para la condición de no existencia de un dispositivo de rotura de presión. En este caso los valores de gradiente hidráulico obtenidos para las hipótesis 1 y 3 son muy altos con respecto a los valores conocidos en acueductos romanos.⁸

Se ha realizado el mismo cálculo para la condición de existencia de un dispositivo de rotura de presión *columnaria* de altura es desconocida. Se ha relacionado para cada hipótesis de trazado del sifón el caudal posiblemente transportado con la altura de la torre, cuyos resultados se puede ver en el gráfico 2 anexo.

Del gráfico 2 podemos concluir que el máximo caudal transportado pudo ser en torno a unos 2.500 m³/día ubicando el depósito terminal el actual emplazamiento de la torre de La Encarnación sin *columnaria*. La ubicación del depósito terminal en este lugar, con una cota de 24 m.s.n.m., generaría un problema de desabastecimiento en la zona alta de la urbe, en donde debieron estar ubicados los edificios más importantes de la misma, situación que se debe tener en cuenta a la hora de extraer conclusiones.

Primeras conclusiones del análisis hidráulico del acueducto del Almuñécar

Después de analizar los resultados obtenidos podemos concluir que la fuente ó captación estaba en capacidad de suministrar entre 17.280 y 34.560 m³/día

de agua, que posteriormente era transportada en una conducción tipo canal abovedado en régimen de lámina libre de una capacidad media de 17.000 m³/día⁹ que correspondería a una altura de 0,90 m. Pero el elemento que determinaría el funcionamiento del sistema sería el sifón del último tramo de la conducción que en el mejor de los casos pudo haber transportado entre 1.800 y 3.600 m³/día¹⁰ con una sola tubería y sin un dispositivo de rotura de presión, rango muy inferior a los valores de caudales reportados por la fuente.

Si establecemos un valor de caudal medio para el sifón de 2.500 m³/día por tubería, la altura de la lámina de agua en los tramos de canal en régimen de lámina libre estaría en torno a unos 0,15 a 0,25 m según el gráfico 1, valores muy similares a los que se registran actualmente en los canales en funcionamiento. Este caudal pudo ser suministrado fácilmente por la galería de las Angosturas, aún en condiciones de sequía, incluso podemos atrevernos a afirmar que la galería debió abastecer no solo a la ciudad de *Sexi* sino al conjunto de explotaciones rurales romanas, *villae*, que debieron existir en sus inmediaciones y que posiblemente tomaban agua del acueducto.

Por otro lado la existencia de una *columnaria* haría que el sifón pierda la capacidad de transporte en función de la altura del elemento, tal y como se refleja en el gráfico 2, pero traería como beneficio la reducción de la presión en la zona de llegada si se contara con un depósito en su parte superior. La presencia de un dispositivo de este tipo en Almuñécar está documentada por las descripciones de geógrafos hispano-musulmanes, como Al-Himyarí, Al-Edrisi o Ibn Al-Jatib, pero su justificación hidráulica debe ser evaluada en profundidad, ya que si bien es cierto que en el mundo romano fueron empleados en algunas ciudades como elementos de reducción de presión (Monteleone *et al.* 2007, 113–120; Hodge [1992] 2005, 300–303), éstos dispositivos contaban con un tanque elevado en su parte superior, situación que no se reseña en las descripciones hechas para el caso de *Sexi*.

Debido a lo expuesto antes, podemos plantear una nueva hipótesis en la cual la torre o *columnaria* pudo estar asociada a un dispositivo intermedio de expulsión de aire ó *coliquaria* (Hodge [1992] 2005, 241–245), que se construiría en un punto alto de la conducción ó curva vertical convexa, asociado a un problema hidráulico de bolsas de aire, como lo es el actual emplazamiento de la torre campanario de la

iglesia de la Encarnación (ver perfil de la figura 14), y que la altura de este elemento estaría determinada por la línea de energía del sistema. Esta hipótesis establecería como punto final del sifón bien la Plaza Eras del Castillo ó las Cuevas de los Siete Palacios, lo que permitiría el abastecimiento de las zonas más altas de la ciudad romana.

NOTAS

1. La longitud exacta del sistema se encuentra en estudio, ya que se desconoce la longitud de la galería de infiltración.
2. La ubicación geográfica de los restos arqueológicos se realizó con un GPS modelo *etrex* SUMMIT GARMIN en una etapa inicial, posteriormente se vació la información en la planimetría georeferenciada a través de las coordenadas UTM realizándose correcciones a partir de la ortofotografía en los casos que se tratara de restos superficiales visibles. La ubicación exacta de las coordenadas de cada elemento se realizará en una siguiente etapa del estudio, en la cual se empleará un equipo de alta precisión.
3. El uso de los Sistemas de Información Geográfica en trabajos de catalogación de restos arqueológicos ha sido una práctica aplicada en los últimos años en diferentes tipos de estudios, incrementándose su uso a medida que ha avanzado el potencial de este tipo de programas (Blanco 2008, 34: 51–58). En investigaciones de antiguos acueductos romanos tenemos dos antecedentes en el acueducto romano de Cádiz (Roldán *et al.* 1997; Pérez y Bestué 2008).
4. En el mes de agosto del 2008 fueron ubicados restos de galerías subterráneas tipo canales abovedados aguas arriba del acueducto de Torrecuevas, en una zona conocida como el Convento, muy cerca de la carretera que comunica Almuñécar con Jete y que posiblemente formaron parte del acueducto romano. A partir de este hallazgo casual y de las labores de limpieza efectuadas por Antonio Burgos, pudimos realizar la medición de la pendiente media y la toma de muestras de mortero de revestimiento interior para su análisis en el laboratorio.
5. A este tramo pertenecen tres grandes construcciones sobre arcos, identificadas por Fernández Casado (1949) como Acueductos I, II y III, terminología mantenida por Molina Fajardo (2000).
6. Para el momento de la elaboración del presente artículo se encuentran en el laboratorio un conjunto de muestras del revestimiento interior del acueducto para su caracterización. Dicho tramo se encontró de forma casual en unas excavaciones próximas al acueducto de Torrecuevas y no se encontraba en uso por el sistema de riego

- actual, por lo cual nos inclinamos a pensar que puede tratarse de un mortero original, situación que debe ser verificada por los resultados del laboratorio.
7. Para el presente trabajo hemos adoptado el valor de coeficiente de rugosidad de Manning n de 0,014 que corresponde a una tubería de hormigón colado in situ.
 8. Valores reportados de gradientes hidráulicos en sifones romanos se encuentran entre 1,1 m/km a 26 m/km, con un valor medio de 9 m/km (Kessener 2001, 140).
 9. Este valor ha sido extraído del gráfico 1 como un promedio de los valores de capacidad máxima de transporte con diferentes valores de rugosidad de Manning.
 10. Existe una primera estimación de la capacidad de transporte del sifón del acueducto romano de Almuñécar, realizada en el 2006 en donde se establece que la tubería estaba en capacidad de transportar 2134 m³/día y que alcanzaría una presión máxima de 32 m.c.a. (Bestué y González 2006, 312).
- #### LISTA DE REFERENCIAS
- Al-Edrisi: *Descripción de África y España* [Versión de R. Dozy y M. J. de Golge 1886].
- Al Himyari: *Kitab ar Rawd al Mictar* [traducción de E. Levi Provençal. 1938. *La Peninsule Iberique au moyen-âge d'apres le Kitab ar Rawd al Mictar*].
- Almagro, A. 2002. «El acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)». En *ARTIFEX Ingeniería romana en España*, 213–240. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Aranda, F., Sánchez, J. L., Andrés, E., Rodríguez, G., Polo M^a E., Sánchez, R., Gutiérrez, J. A. 2006. *Las presas de abastecimiento en el marco de la ingeniería hidráulica romana. Los casos de Proserpina y Cornalvo*. Inédito.
- Benavente J. 1985. *Las aguas subterráneas en la Costa del Sol de Granada*.
- Benavente J., Sánchez-Díaz, L., Castillo, A. 2005. «Acuífero de Almuñécar». En *Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz*, 103–114. Granada: Universidad d Granada y Agencia Andaluza del Agua.
- Bestué I. y I. González. 2006. «Roman Siphons in Spain». En *Cura Aquarum in Ephesos: Twelfth International Congress on the History of Water Management and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region*, 311–317.
- Blanco, A. 2008. «La gestión e investigación del patrimonio arqueológico mediante Sistemas de Información Geográfica». En *Patrimonio* 34: 51–58. Valladolid: Fundación del Patrimonio Histórico de Castilla y León.
- Calvache, M. 2002. «Acuíferos detríticos de la costa de Granada». En *Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces, Libro homenaje a Manuel del Valle Cardenete*, 425–444. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Instituto del agua de Andalucía y la Diputación Provincial de Granada. .
- Castillo Elsitdié, L. G., Acero Pérez, J., García León, J. 2008. «Estimación teórica de la capacidad hidráulica de las cloacas romanas de Mérida». En *IV Congreso de Obras Públicas en la Ciudad Romana*, 251–262. Lugo – Guitiriz: Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas.
- Fernández Casado, Carlos. 1949. «La conducción de aguas de Almuñécar». En *Archivo Español de Arqueología XXII*, 313–333. Madrid.
- Fernández Casado, Carlos. [1972] 2008. *Acueductos romanos en España*. Madrid.
- Fernández Casado, Carlos. 1983. *Ingeniería Hidráulica Romana*, Madrid.
- González, I. y I. Velázquez. 2004. «Los acueductos y sus técnicas constructivas». En *Ingeniería romana en España*, 105–141. Madrid: Fundación Juanelo Turriano.
- Hodge Trevor [1992] 2005. *Roman Aqueducts & Water Supply*. London.
- Ibn al Jatib: *Historia de la Dinastía Nazerita* [Traducción de Simonet, 1860. *Descripción del reino de Granada*].
- Kessener, P. 2001. «Vitruvius and the conveyance of water». En *BABESCH, Annual Papers on Mediterranean Archaeology N 76*, 139–158.
- Méndez, Manuel. 1995. *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello y Fundación Polar.
- Molina Fajardo, Federico. 2000. *Almuñécar Romana*. Granada.
- Monteleone M., Yeung, H., Smith, R. 2007. «A review of Ancient Roman wáter supply exploring techniques of pressure reduction». En *Water Science & Technology: Water Supply Vol 7 No 1*, 113–120.
- Pérez Marrero, Jenny e Isabel, Bestué Cardiel. 2008. «Avance del estudio hidráulico del acueducto romano de Gades». En *IV Congreso de las Obras Públicas en la Ciudad Romana*, 235–249. Lugo – Guitiriz 2008: Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas.
- Roldán, L., Baena J., Blanco, C., Bermudez, J., Gracia, E. 1997. «S.I.G. y arqueología Romana. Restitución del trazado del acueducto de Cádiz». En *Los S.I.G. y el análisis espacial en Arqueología*, 255–272. Madrid: Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid. .
- Tovar Sabio, A. y Camero Ucles, T., 1986: *Conducción romana de Sexi*. Proyecto fin de Carrera. Inédito.
- Ven Te Chow. 2000. *Hidráulica de los canales abiertos*, 98–104.
- Ventura, A. 1993. *El abastecimiento de agua a la Córdoba Romana I: El Acueducto de Valdepuentes*.
- Yáñez, J, González, P. y Bustos A. 1994. *Nuestra Señora de la Virgen del Agua «Jete»*.