

## LOS VIAJES DE AGUA DE MADRID

Por EMILIO GUERRA CHAVARINO

Ingeniero Industrial

Cuando queremos estudiar la construcción de los viajes de agua madrileños, nos encontramos con la sorpresa de que no se conservan los proyectos utilizados en la antigüedad, y lo que es más singular, no sabemos por dónde se encuentran muchas de las galerías que nuestros antiguos perforaron bajo nuestros pies.

Pero no todo es desconocimiento porque contamos con la obra de tres autores que nos ofrecen una amplia gama de conocimientos técnicos que no podíamos imaginarnos tuvieran en su respectiva época. Se trata de la herencia cultural recibida de Céspedes (1606), Ardemans (1725) y Arnar de Polanco (1727).

Estos tres autores los considero como las fuentes máximas de información técnica sobre los Viajes de Agua madrileños. Sus obras principales a las que haré continua referencia en este trabajo, son:

- Andrés de García de Céspedes (¿?-1611), Cosmógrafo Mayor de Felipe III, autor en 1606 de «*Instrumentos nuevos de geometría, muy necesarios para medir distancias y alturas, sin que intervengan números, como se demuestra en la práctica*». Esta obra incluye un «*Tratado sobre la conducción de aguas*». Se le atribuye la invención del instrumento conocido por Cuadrante Geométrico. Corrigió las tablas de Alfonso el Sabio. Juan de Lastanosa en su manuscrito «Los 21 libros de los ingenios y las máquinas», añade al cuadrante de Céspedes dos pequeños pesos para comprobar la verticalidad y describe un instrumento con el cuadrante de Céspedes acoplado, con lo que lo convierte en instrumento de nivelación<sup>1</sup>.
- Teodoro Ardemans, Fontanero Mayor en tiempos de Felipe V, veedor de las conducciones de agua, Maestro Mayor de las fuentes de Madrid,

---

<sup>1</sup> Han estudiado a García de Céspedes: Nicolás Antonio, I, 74; Fernández Duro; Germán Latorre; Gallardo, t. II y t. III, p. 22; Picatoste, Apuntes, p. 376; Fernández Vallin, pp. 40, 54, 64, 78, 92 y 249.

Tracista Mayor (arquitecto) de las obras reales, pintor, autor en 1724 de «Fluencias de la Tierra y curso subterráneo de las aguas. Medidas de las aguas». Muy interesantes resultan sus Ordenanzas<sup>2</sup>.

- Juan Claudio Arnar de Polanco, profesor de matemáticas básicas en tiempos de Felipe V, autor del noble arte de leer, escribir y contar, maestro de la filosofía de la destreza de las armas y profesor de matemáticas en la primera mitad del siglo XVIII, en tiempos de Felipe V. Escribió en 1727 «Arithmética inferior y geometría práctica y especulativa: Origen de los nacimientos de las aguas dulces y gordas de esta coronada villa de Madrid, sus viajes subterráneos con la noticia de las fuentes públicas y secretas de las casas de señores y particulares, y la cantidad que tiene cada uno», que integra el «Tratado de los quatro elementos, origen y nacimiento de las aguas y fuentes de Madrid, y sus viages subterráneos». También escribió en 1723 «Antiguos viajes de agua. Agua que tiene Madrid para su abasto».

Céspedes nos muestra sus instrumentos de fácil manejo para calcular alturas, desniveles y distancias. Nos enseña el fundamento y uso del Báculo de Job o ballestilla y del nivel de Caballete o de Tranco, instrumentos especiales para el diseño de galerías subterráneas.

Ardemans en su faceta de arquitecto, nos transmite la ciencia heredada de los antiguos especialistas del tema (Vitruvio, Plinio, Dioscórides, Josefo, etc.), mostrándonos cómo se deben realizar las obras, teniendo en cuenta las ordenanzas de las que fue autor. Fue un profesional conocedor de su trabajo. Por su parte, Arnar nos describe los viajes más importantes señalando las arcas, fuentes y caudales de cada uno. Demuestra ser un matemático sencillo que tuvo ocasión de acceder a unos datos del Concejo y Junta de las Aguas, muy valiosos para nuestro estudio, y tuvo la feliz idea de transmitírnoslos.

Comencemos repasando el concepto de Viaje de Agua, en adelante Viaje.

La captación de aguas subterráneas para abastecimiento de la población, mediante los viajes, fue el único sistema utilizado en Madrid desde su fundación en época musulmana (siglo IX) hasta mediados del siglo XIX en que se creó el Canal de Isabel II. Durante esos años, los madrileños se han mostrado siempre orgullosos, no ya por la abundancia de agua en la villa, sino de ese raro sistema de captación de las mismas<sup>3</sup>.

Santos Madrazo opinaba que «los viajes de agua han sido la gran originalidad de Madrid durante siglos» y añadimos que merecería, incluso, incluirse un recuerdo de ellos en nuestro escudo, ya que su nombre, Maÿra,

<sup>2</sup> Véase un análisis de esta obra en S. N. DAVIS, «Teodoro Ardemans, pioneer water supply engineer of Spain», en *Water Resources Bull.*, vol. 9, 1973, pp. 1028-1034.

<sup>3</sup> OLIVER ASÍN, *Historia del nombre de Madrid*.

y su composición, Mañrit, dio origen al de la ciudad. Su aprovechamiento cultural y su explotación turística aún no han comenzado. Recordemos que el antiguo escudo de Madrid<sup>4</sup> consistía en una alegoría al agua y al pederal. Según López de Hoyos<sup>5</sup>, «representaba sobre unas ondas de agua, un pederal semisumergido en agua, con dos eslabones a los lados entrelazados que lo hieren, haciendo que se produzcan centellas de fuego». Al pie, la siguiente *leyenda* (terceto): «Fui sobre agua edificada, / mis muros de fuego son, / esta es mi insignia y blasón».

El escritor Fernández de Oviedo nos dijo a principios del siglo XVI:

«... En muchas partes de esta villa, el agua está cerca de la superficie de la tierra, y muy someros los pozos, tanto que con el brazo, sin cuerda, pueden tomar el agua en ellos...

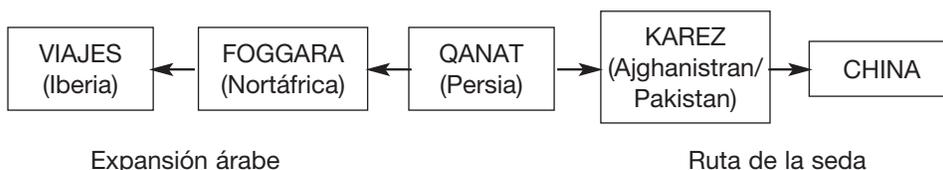
Así que con razón se movieron á decir los antiguos que aquella villa está armada sobre agua ó fundada sobre agua, ...».

Juan Hurtado de Mendoza (año 1550) dijo: «De fuego ser cercada, te dijeron / antiguos siglos, y sobre agua armada / tus venas de agua y sierras luz te prestan».

Este sistema de captación de las aguas subterráneas, con el nombre universal de Qanat o Khanats, es de origen oriental, siendo conocido en Persia-Armenia desde el siglo VII a. de C. Fue introducido por los árabes en la península Ibérica en el siglo VIII.

No existe referencia alguna en documentos geográficos árabes sobre los Khanats de Mañrit.

#### LOS QANAT EN LA HISTORIA



De tiempos cristianos, tenemos las primeras referencias:

1.<sup>a</sup> La primera, en el Fuero de Madrid, de 1202. Se trata del arroyo Matrice (nombre dado por Oliver Asín al que desde las fuentes de Sancti Petri (Puerta Cerrada) pasaba por debajo de un puentecillo (precursor del actual viaducto de Bailén) hacia los baños y tenerías, que se encontraban aguas

<sup>4</sup> *Relaciones topográficas de Felipe II*, Madrid.

<sup>5</sup> López de Hoyos, cronista y Alcalde de Madrid, preceptor de Miguel de Cervantes.

abajo, junto al Manzanares. El arroyo, aguas arriba del puentecillo, era potable, mientras que a partir de dicho puente, el arroyo era para uso artesanal, pero se utilizaba como vertedero. Ante la amenaza constante de que se contaminara el tramo potable, se incluyó la rúbrica LXXXIII en el Fuero, con el siguiente texto:

«Qvi tripas lauare del alcantariella de Sancti Petri ad ariba, pectet I octaua morabetino a los fiadores».	«Quien lavara tripas desde el puentecillo de San Pedro, hacia arriba, pague una ochava de maravedí a los fiadores».
--	---

Alcantariella es sinónimo de puentecillo, ya que procede de Alcántara, que significa puente. Este puente se aprecia en la «Vista de Viena» de Windgärde.

2.<sup>a</sup> Posteriormente, en tiempos de los RR.CC, en el Libro de Acuerdos del Concejo madrileño (años 1478 y 1481). En el primero, imponiendo penas a los que hurtaran aguas ajenas, y en el segundo, permitiendo a los curtidores aprovechar las aguas del arroyo «Matrice», siempre y cuando se responsabilizaran de la conservación y mantenimiento del viaje.

Al margen de las palabras, se encuentran los hechos. Hoy existe en Puerta Cerrada, bajo la Cruz situada en el centro de la plaza, un registro de un viaje de agua (Fernández de los Ríos en su Guía dijo que dicha Cruz es un «adorno de un arca de agua que constituye su pedestal»). Cerca de allí, en la Plaza de los Carros, se ha descubierto en unos trabajos arqueológicos un tramo de viaje de agua de origen musulmán. En los informes de los directores de dichos trabajos, en 2004, Luis caballero, Manuel Retuerce y Carmen Priego, se nos confirma la autoría musulmana de los viajes<sup>6</sup>.

El recorrido del «viaje» islámico (arroyo Matrice) sería, más o menos, el siguiente: nacía en las Fuentes de San Pedro, cerca de Puerta Cerrada, y descendía por Cava Baja, hacia la plaza de los Carros, donde recibía las aguas de San Andrés (es posible que allí se formara una derivación hacia la Costanilla de San Pedro y calla Segovia), continuando por la calle de Don Pedro para alcanzar la calle de Segovia, pasando por los Caños y Pilares Viejos siguiendo una dirección similar a la del trazado de la muralla.

Ardemans reconoció la existencia de viajes de agua musulmanes al hablar de los hundimientos de las calles de Madrid, aludiendo a las perforaciones fraudulentas y a las «minas antiguas de Madrid, hechas en tiempo que le ocuparon los moros», que no son suficientemente profundas.

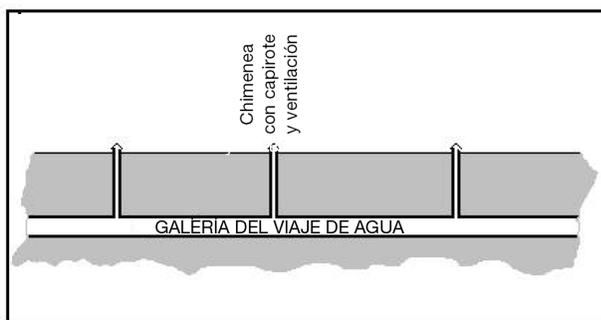
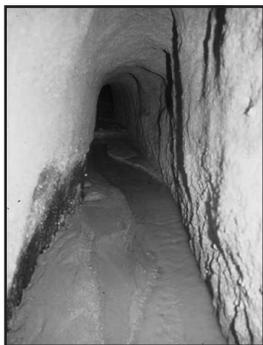
<sup>6</sup> Frases de los informes: «El ramal de Khanat tiene unos 10 m de largo... de época hispanomusulmana... galería, de interés arqueológico, por ser el primero que se ha podido documentar en la Península Ibérica, ..., del Bajo Abroñigal..., pendiente de 1/1000, ... la construcción del viaje se realizó en un momento bastante anterior a la conquista castellana de 1085.

Los «Viajes de Agua» consisten, en esencia, en tres partes esenciales: una red de pozos y galerías de drenaje o captación, excavadas en el terreno, una galería de conducción y una nueva red, esta vez de distribución con la que se alcanzan las diversas fuentes encargadas del suministro de aguapara su consumo.

Las galerías de captación son minas porque se encuentran bajo el nivel freático, y las de transporte y distribución, por encima del mismo, todas ellas con la suficiente pendiente para que el agua discurra por gravedad. Las perforaciones de captación se realizaban en la capa superficial de la zona húmeda. A mayor profundidad se hubiera captado mayores caudales, pero el inundarse las galerías impediría el trabajo manual de los poceros.

Ardemans<sup>7</sup> definió los viajes de agua como una serie de galerías subterráneas, cuyo fin era llevar agua que captaban a través de «los vexigones<sup>8</sup> de tierra llena de agua, procedentes de la lluvia», hasta la ciudad.

Las galerías iban jalonadas por pozos-chimeneas colocadas espaciados regularmente durante su construcción, pues a través de ellos se extraía la tierra excavada, y durante su funcionamiento, proporcionaban acceso y el oxígeno necesario para la respiración del personal de mantenimiento.



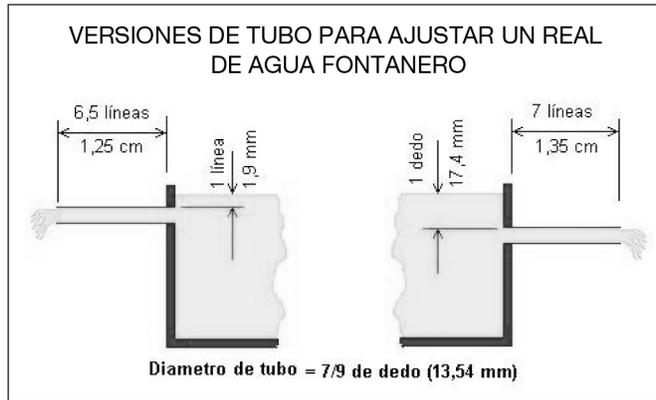
Los puntos de consumo de esa agua consistían en las fuentes privadas (incluidos conventos, hospitales, albercas para campos de cultivo, etc.) y las fuentes públicas para el vecindario y los aguadores (incluidos los lavaderos, abrevaderos, etc.). En Madrid se llegaron a construir algo más de 75 fuentes públicas.

Resumiendo, los viajes eran unos ríos subterráneos artificiales que desembocaban en aljibes desde donde se distribuía el agua a los usuarios.

<sup>7</sup> Theodoro Ardemans, arquitecto y responsable de los viajes de agua en el siglo XVIII (ver bibliografía).

<sup>8</sup> Lentejones en el argot.

En 1850 existieron cerca de 30 Viajes en Madrid, cuyas galerías sobrepasaban, según Gil Clemente, los 124 km, de los cuales unos 70 km correspondían a cinco viajes considerados como principales: El Alto y el Bajo Abroñigal, Alcubilla, Amaniel (también llamado de Palacio) y La Fuente Castellana.



El reparto de caudal de agua entre las diferentes fuentes conectadas a cada Viaje se realizaba utilizando la unidad de medida conocida por Real de agua fontanero (RA), valor del caudal continuo que salía por un orificio circular cuyo diámetro era igual al de un real de a ocho segoviano. Debido a no quedar definida la longitud del orificio ni la profundidad a la que se situaba respecto a la superficie del agua, el caudal variaba según las características del tubo utilizado. La longitud del tubo para unos era de 6,5 líneas (1,25 cm) y para otros de 7 líneas (1,35 mm). La altura de carga para unos era de 1 línea (1,93 mm) y para otros de 1 dedo (17,4 mm), contando desde el borde superior de los orificios. Ante tal variación, se fijó el siguiente valor:

$$1 \text{ RA} = 2,98 \text{ pulgadas}^3/\text{s} = 0,037 \text{ L/s} = 134 \text{ L/h}^9$$

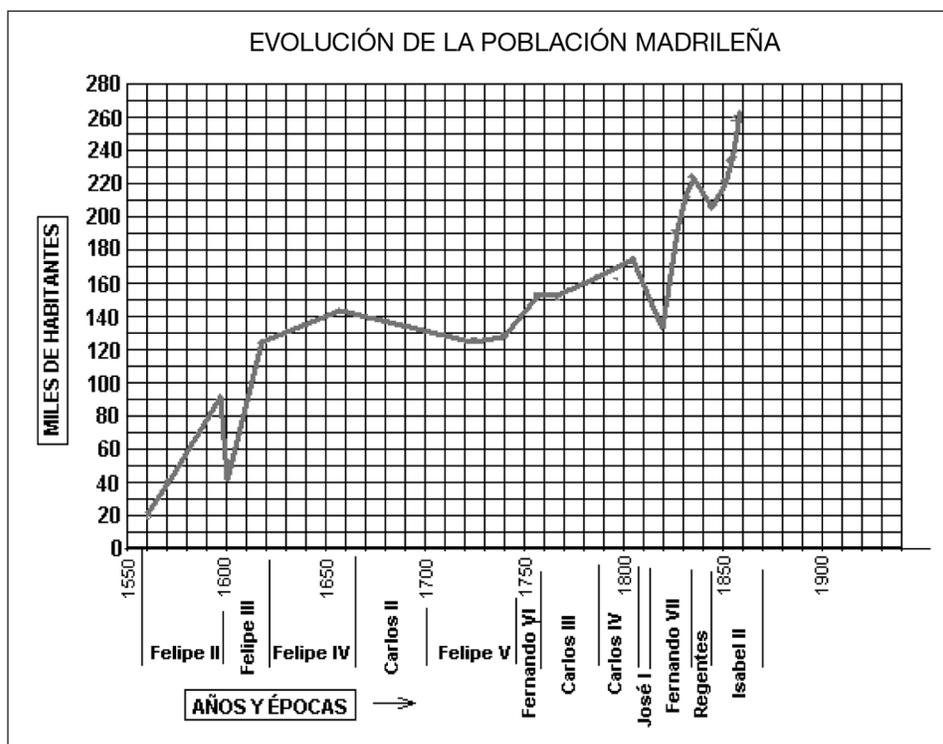


<sup>9</sup> 1 pulgada<sup>3</sup> = 12,518815 cm<sup>3</sup>.

El auge de los Viajes se alcanzó a partir del traslado de la Corte a Madrid por Felipe II. En ese tiempo se incrementó considerablemente la población.

Es interesante conocer la evolución de la población madrileña a lo largo de los años para conocer las necesidades en agua y que tras continuos problemas debidos a la escasez, dieron lugar al abandono de los Viajes, que fueron sustituidos por el abastecimiento desde el río Lozoya realizado por el Canal de Isabel II.

De la importancia de estos Viajes de Madrid, baste decir que la UNESCO recomendó en mayo de 2002, su protección como monumento de herencia mundial.



**PRECIO DEL AGUA SUMINISTRADA**

En el siglo XVIII el real de agua en cualquier arca de reparto costaba 4.000 ducados de vellón al año. El medio RA costaba 2.000 ducados. El cuartillo costaba 1.000. El medio cuartillo 500 ducados. El medio cuartillo o paja era la menor cantidad que se podía contratar. Cada usuario del

servicio pagaba un 3 por 100 de esa cantidad, mediante contrato «a censo». La arroba de agua salía a algo menos de 1 Cornago<sup>10</sup>, sin contar gastos de mantenimiento de las galerías.

#### FUENTES Y AGUADORES

Llegaron a existir unas 500 fuentes particulares (el agua les llegaba por contrato anual), y unas 77 públicas que suministraban agua gratuita a 128 caños.

Los aguadores eran las personas encargadas de suministrar cántaros de agua a domicilio. Cada fuente tenía una dotación determinada, expresada en RA, y en función de ella se le asignaba un número de aguadores. En 1594 se fijó la capacidad de los cántaros en 5 azumbres (10 litros) cada uno. En el siglo XIX, el número de aguadores se acercaba a los 1.000.

En aquellos tiempos, los fontaneros realizaban el tendido de las cañerías, preocupándose de que las «ligaduras» o uniones resultaran estancas. Francisco Xavier Barra dijo en 1832 que los fontaneros sabían poco de la técnica de los viajes, por lo que ante preguntas comprometedoras, contestaban de forma que el tema quedara envuelto en el misterio.

Arnar de Polanco<sup>11</sup> advertía de los problemas que surgían por deficiencias en la red de suministro. El que el agua no corriera por una fuente se podía deber a derrumbe de galerías, o por el aire que se introducía en los caños y los «rebienta». Theodoro Ardemans<sup>12</sup> recomendaba que «el Maestro Fontanero no debe dejar las llaves de las arcas de repartimiento al oficial porque es persona sobornable, llevando a cabo picardías como dejar sin agua a quienes no le caen bien, tapando el Marco (repartidor) con betún». También opinaba que el Maestro Fontanero debía inspeccionar los Marcos de los particulares, al menos, una vez por semana, para comprobar que a cada propietario le llega la cantidad de agua que le correspondía.

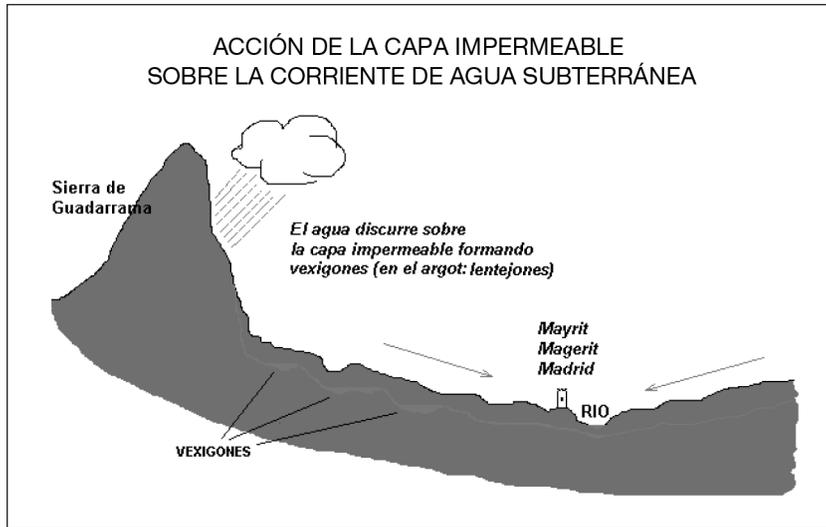
#### EL CICLO DEL AGUA

Para hacernos una idea del nivel de conocimientos que se alcanzaba en aquellos tiempos baste decir que se pensaba que el agua subterránea procedía del mar y que el hecho de que estuvieran los nacimientos y los mana-

<sup>10</sup> 1 Ducado valía 375 Maravedíes, y un Maravedí, valía 4 Cornagos.

<sup>11</sup> Libro «aritmética...», capítulo VIII, p. 239.

<sup>12</sup> Libro de THEODORO ARDEMANS, «Fluencia de la Tierra y curso subterráneo de las aguas», capítulo 26, folio 240.



deros a un nivel superior, era debido a la acción del sol que actuaba a modo de ventosa. Lo demostraban con experimentos como el que describe Ardemans en su obra.

Nuestros autores muestran diversos métodos a seguir para averiguar cuál es la mejor agua y más delgada para beber. Enumeran diferentes pruebas a realizar, de las que relatamos las siguientes:

- Tomando dos pedazos del mismo lienzo, de igual peso y empapados durante el mismo tiempo, cada uno en un agua cuya calidad se desea conocer. Se dejarán secar los lienzos al aire en las mismas condiciones, sin darles el sol. Se pesarán de nuevo y el lienzo que pesare menos será el que empapó el agua mejor y más delgada porque dejó menos tierra.
- Midiendo la densidad de las aguas, la mejor será la menos densa. Aunque el concepto de densidad no fue manejado por Arnar de Polanco, sí que utiliza un método seguido en esos casos. Consiste en fabricarse un densímetro utilizando una vasija de cristal vacía introducida en el agua a ensayar. La vasija flotará, pero su línea de flotación no será la misma con todas las aguas. El agua en la que la vasija se hunda más, será la menos densa y, por tanto, la más delgada. La utilización de una escala con grados, hace posible valorar dicha calidad. El texto de Arnar (p. 222) contiene en este punto uno de sus errores. Dice así:

«... y en el agua que se hundiese *menos*, será la más delgada, que los mismos grados que quedasen sin entrar en el agua lo dirá».

Arnar de Polanco pesó las aguas<sup>13</sup> de los principales Viajes de Madrid, tomando de todas ellas una arroba (16,133 L). Los resultados se muestran tabulados y han sido reproducidos por todos los autores que han tratado el tema, ya que son las únicas mediciones de que se dispone de aquellos tiempos.

Arnar de Polanco sacó la diferencia en adarmes entre una arroba de las tres aguas que consideró: las del Bajo y Alto Abroñigal y la de la Castellana. De los pesos experimentados sacó que «el agua del Bajo Abroñigal pesó 4 adarmes menos que la del Alto Abroñigal, y que la del Bajo Abroñigal aventaja en lo ligero a la de la Castellana en 14 adarmes». Al considerar que 1 onza equivale a 16 adarmes, se obtiene la quinta columna. La mayor o menor cantidad de sales disueltas en el agua le daba el carácter de dura o blanda.

TIPO DE AGUA CONSIDERADA	MASA DE UNA ARROBA DE AGUA					MASA EN VOLUMEN KG/L
	Libras	Onzas	Adarmes	Onzas + Adarmes	kg <sup>14</sup>	
1. Caños del Peral	34,5	0	8	8 adarmes	15,884	0,984
	34,5	8	6	134 adarmes		
2. Caños del Peral	34	0	143	143 adarmes	15,896	0,985
	34	8	15	143 adarmes		
Bajo Abroñigal (Puerta Cerrada)	34	1	14	30 adarmes	15,697	0,973
Alto Abroñigal (Puerta del Sol)	34	2	2 <sup>15</sup>	34 adarmes	15,704	0,973
Fuente Castellana (Pl. Santa Cruz)	34	2	12	44 adarmes	15,722	0,974
	34	0	44	44 adarmes		
Fuente del Berro	34	0	92	92 adarmes	15,805	0,980
	34	5	12	92 adarmes		
Fuente del Rey (fuente del Cura)	34	0	90	90 adarmes	15,805	0,980
	34	5	10	90 adarmes		
El peso (mejor dicho, la masa) del agua variaba según el viaje considerado. Recordemos que 1 libra equivale a 16 onzas, y que 1 onza equivale a 16 adarmes. Estos valores de Arnar de Polanco, son los que Madoz incluyó posteriormente en su diccionario.						

Con estos datos, Arnar manejaba sin saberlo el concepto actual de «masa en volumen», lo que anteriormente llamábamos densidad absolu-

<sup>13</sup> Las pesadas se realizaron por Alberto de Aranda, tasador en el contraste de la platea. Al relativizar el peso respecto a una misma unidad de volumen, la arroba, obteniendo sin saberlo el valor de la masa en volumen, antigua densidad.

<sup>14</sup> Siendo 1 libra = 460 g; 1 onza = 28,75 g; 1 adarme = 1,7968 g.

<sup>15</sup> Que son una octava de onza (16/8 = 2).

ta. Me refiero al valor de la masa que tiene la unidad de volumen de dicho cuerpo. Al referirse al oro, definió el volumen de referencia como el de un cubo cuyo lado era la cuarta parte del pie castellano, o sea, 4 dedos, equivalente a 69,6587 mm, resultando un volumen de 0,338 litros. Para el oro obtuvo: 221 onzas + 463/2197 de onza (fracción cercana a 1/4 cuando había podido decir cercana a 1/5, pues su valor era muy próximo a 1/4,745...). Para la plata y el agua, los datos obtenidos se incluyen en la tabla.

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS, APLICANDO EL SISTEMA DECIMAL Y CALCULANDO EL EQUIVALENTE EN EL SISTEMA INTERNACIONAL

	A	B	C = A x B	D	E = C/D
	<i>Onza</i>	<i>g/onza</i>	<i>Gramos</i>	<i>Volumen refer.</i>	<i>Masa en vol.</i>
Oro	221 + 463/2197 = 221,21074	0,02875581	6,3610917	0,3380073 dm <sup>3</sup>	18,819391 kg/m <sup>3</sup>
Plata	110 + 1870/2197 = 110,85116	0,02875581	3,1876137	0,3380073 dm <sup>3</sup>	9,430606 kg/m <sup>3</sup>
Agua	11 + 1753/2197 = 11,797906	0,02875581	0,3392582	0,3380073 dm <sup>3</sup>	1,0037008 kg/m <sup>3</sup>

Arnar de Polanco dice en la página 327 de su Aritmética, que el agua de los Caños del Peral «pesó en el contraste, 34 libras y media y 8 adarmes, que son 134 adarmes; de modo que pesa más que la de la Fuente del Berro, 42 adarmes en cada arroba». Esta expresión es errónea, pues 134 adarmes equivalen a 8 onzas + 6 adarmes (debió escribir: 34 libras y media onza y 6 adarmes, que son 34 libras y 134 adarmes).

En la tabla de la página 327, Arnar da para los caños del Peral el valor de 34 libras + 143 adarmes. Al ser 143 = 8 onzas + 15 adarmes, nada coincide con lo anterior. Aquí consideramos que Arnar comete un segundo error al «bailar» las dos últimas cifras, poniendo 143 en lugar de 134.

Para comprender mejor las operaciones realizadas, expongamos las correspondientes al agua del viaje del Bajo Abroñigal. Sus valores expresados en kilogramos serán <sup>16</sup>:

34 libras = 34 x 0,460093 kg = 15,643162 kg	Si 16,133 litros de agua tienen una masa de 15,697078 kg, su masa en volumen será:
1 onza = 0,0287558 kg	
14 adarmes = 14 x 1,797237 g = 0,0251613 kg	Masa en volumen: 15,697/16,133 = 0,973 kg/L #
Suma total: 15,697078 kg	

<sup>16</sup> 1 libra = 16 onzas = 460,09 g; 1 onza = 16 adarmes = 28,75 g; 1 adarme = 1,79 g.

El agua más delgada era la de los viajes del Abroñigal, y la más «gorda» era la de los Caños del Peral, seguida por la de la Fuente del Berro, ésta, la más famosa de todas.

Ardemans, en el capítulo IX de su libro (p. 57), nos aconseja cómo conservar el agua almacenada para que no se corrompa. Indica que se ha de pasar las aguas por tres recipientes escalonados conteniendo «guixos» y arena que actuará como filtro (actualmente se sigue este método utilizando diatomeas en vez de arena). Del fondo del primer recipiente se vierte el agua al segundo y del fondo de éste, al tercero. De esta forma se decantará lo que llevase disuelto. Se aconsejaba añadir al agua «cañutos de azufre, y pan de harina de trigo para quitar lo salitroso», y si no bastase, «se cocerán tres panes de harina de trigo, y si no bastase con tres panes, poner dentro de cada vasija uno, y esto bastará para consumir lo salitroso que le hubiere quedado, y si tampoco no bastase, será preciso cocer en la misma agua que se ha de beber».

Otro remedio propuesto por Ardemans: «Tomando un vaso de vidrio o redoma grande, bien gruesa y que se puede tapar bien, la cual se llenará muy bien de sal y hecho, se cerrará muy bien la boca de la redoma, si pudiese ser, herméticamente que es mejor y sino, con un buen betún al olio [aceite] bastará, como no puede respirar, y luego se pone este vaso en el depósito donde estuviere el agua o cisterna y se ha de colgar en el aire dentro del agua, sin tocar las paredes ni suelo y si tiene el agua alguna cosa salitrosa, se irá a pegar a la redoma».

Plinio dijo que «se eliminaba lo salitroso y lo amargo, echando una gachuela de harina de trigo, meneándola bien con un bastón. De esta manera, en tres horas se podrá beber el agua». Hubo quien colaboró diciendo que se obtiene el mismo resultado «si se fríe un pan de ordio (cebada), y se le echa al agua».

Laguna, traductor de Dioscorides, dijo «que para dar bellissimo sabor al agua no hay otra cosa mas eficaz que hervir dentro de ella 4 ó 5 nísporas maduras y le quedara un colorcito como de canela muy claro y que además de ser de bello sabor conforta el estómago relajado».

Josefo escribió que «estando Moisés en los desiertos de Moab, solo disponía de agua de un pozo pero estaba sucia y amarga. Mandó que sacaran agua y la volvieran a echar dentro varias veces. Con el golpeo se le quitó el mal olor, quedó bellissima y muy delgada. Lo explicó diciendo que al estar retenida y sin golpeo, el agua se corrompe».

Ardemans sigue dando remedios para «potabilizar» el agua. Un remedio casero «para agua zarca consiste en tomar una piedra lumbre y echarla en tinaja con un poco de almendra. Como resultado, se precipitará todo lo zarco y quedará clara para beber».

El agua era de compra, de censo o de gracia. Era gratuita para aquellos que iban a la fuente pública a tomarla, para los que permitían el acceso a

una arca desde su casa, y para los hospitales y religiosos que carecían de Viaje.

En aquella época se conocían las obras de geóponos hispanomusulmanes como Al-Tignarî, que clasificaba ya el agua en cuatro clases o especies: el agua de lluvia, el agua de los ríos, el agua de las fuentes y el agua de los pozos. Abû l-Jayr añadía a las expuestas, la dulce, la salada y el agua de mar. Ibn al-'Awwâm añadía por su parte las aguas ferruginosas, sulfúreas y de índole semejante.

Céspedes dedica los capítulos XV y XVI de su libro para hablar de las calidades de agua. Ardemans se inspira en ellos para escribir, entre otros, su capítulo VIII.

Sobre la calidad del agua de Madrid, comparemos lo expresado por Arnar (en 1717) y Madoz (en 1848):

TEXTO DE AZNAR (p. 221)	TEXTO DEL DICCIONARIO DE MADOZ (p. 188)
<p><i>«El agua que tiene para su provisión y abasto esta insigne Villa de Madrid, nace y sale de entre arena áspera y roja de tan buena calidad y bondad que es muy delgada y de buen gusto, de modo que no se halla en ella color, olor, ni sabor, y tiene las virtudes de ser líquida, fecunda y potable, propiedades que han de tener las aguas dulces para ser buenas y provechosas a los hombres para la salud».</i></p>	<p><i>«El agua que tiene Madrid para su provisión y abasto nace y sale de entre arena áspera y roja, adquirida por filtración en unas minas subterráneas, y se forman de las que derraman las sierras inmediatas, cuya circunstancia la hace sumamente delgada y de excelente calidad, de modo que no se halla en ella color, olor ni sabor, y tiene las virtudes de ser líquida, fecunda y potable, propiedades que han de tener las aguas dulces para ser provechosas á la salud».</i></p>

#### CONSTRUCCIÓN DE UN VIAJE. ALUMBRAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El primer paso a dar para la construcción de un Viaje era localizar (alumbrar) los «lentejones» de agua en zonas donde el nivel freático<sup>17</sup> se encontrara a nivel superior al de los puntos de consumo previstos. En principio, el desnivel existente entre el alumbramiento y las fuentes debía corresponder a una pendiente del orden del 1 por 100, o superior, para que el agua se desplazara por gravedad.

<sup>17</sup> Nivel freático es la superficie que cubre la zona del subsuelo donde la tierra se encuentra empapada del agua acumulada al existir una capa inferior de tierra impermeable. Esta agua puede encontrarse estancada o en movimiento, en cuyo caso discurriendo hacia la cuenca de un río. Los Avenares eran sitios donde existían venas de agua.

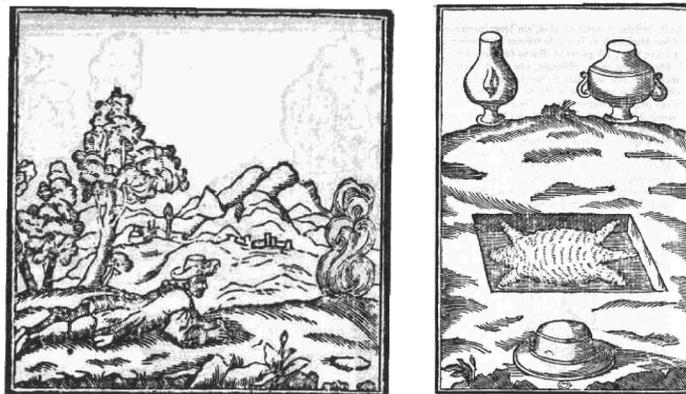
Se planteaban dos problemas:

1. Saber localizar el lugar donde se tenía que perforar para alumbrar agua.
2. Saber si el lugar localizado estaba a nivel más elevado o no que el lugar a donde iba destinada esa agua, principalmente cuando estaban distanciados varios kilómetros. Céspedes llama al punto de origen o alumbramiento «nacimiento» y al de destino, las fuentes, «manadero».

Para localizar dichos lentejones, se seguían las antiguas técnicas de observación sobre signos externos de origen oriental (Nabateo) y latino:

1. Observar los signos externos que las detectaran (plantas, abundante lodo, etc.). Se prestaba atención especial a la «anea», caña gruesa, identificada como «esparto».
2. Utilizar materiales que se impregnaran de humedad al estar enterrados. Este sistema fue mencionado por Demócrito, Vitrubio, Plinio y en la Agricultura Nabatea.

Céspedes (Cap. XV, p. 26) y Ardemans (Cap. VI, p. 34), recordando a Juanelo Turriano<sup>18</sup> nos dicen: «Si queremos conocer estas señales se hará así: póngase un hombre en el suelo boca abajo, y asentando la barba sobre un ladrillo que esté en el suelo (Ardemans especifica: con una mano tendida debajo de la barba), encamine la vista por encima de la superficie de la tierra, y donde viere que salen unas como neblinas, allí está cerca el agua.



<sup>18</sup> El italiano juanelo, cuyo nombre era Giovanni Torriani (1500?-1585), vivió en tiempos de Carlos I y Felipe II. Pasó a la historia por haber ideado el ingenio de Toledo, consistente en un mecanismo que elevaba las aguas del Tajo hasta Toledo, para su utilización.

Esta observación se tiene que hacer antes que salga el sol, en tiempo sereno y en el tiempo de caniculares».

También se puede hacer esta prueba: «Haciendo un hoyo de tres pies en cuadrado (unos 85 cm de lado), por cuatro de profundidad (1,1 m), y en el meterá un vellón de lana (piel de oveja) y se tapará muy bien con unas ramas de suerte que no evaporice y a las 24 horas después de puesto, o por la mañana temprano, se irá a registrar, destapando el hoyo, y se tomara el vellón en la mano, se le apretara muy bien y saliendo agua de él, o humedad, de suerte que humedezca la mano, es muy cierto que hay agua». Al probar el agua desprendida de la lana se conocía el sabor del agua que podía extraerse.

No hace mucho tiempo, algunos zahoríes utilizan materias higroscópicas para determinar el lugar del que se puede obtener más agua. Según D. Ignacio Ruiz<sup>19</sup>, se utiliza la mezcla formada por «100 g de azufre, 100 g de cardenillo de cobre, 100 g de cal viva y otro tanto de incienso blanco. Se reduce a polvo, se mezcla bien y se coloca en una olla de tierra nueva, barnizada». Se pesa la mezcla y «se encierra en un hoyo de 30 cm de profundidad. A las 24 horas se extrae y se pesa nuevamente».

Otros métodos Nabateos para detectar el agua oculta, fueron: examinar la humedad que haya en la superficie terrestre; arrojar un puñado de polvo sobre algunas piedras y comprobar si se humedece y en qué grado lo hace; aplicar el oído en las fisuras del terreno para percibir si hay ruido de agua; analizar la calidad de la tierra y en comprobar cómo tiene ésta sus terrones.

Para conocer *a priori* la profundidad del nivel freático, unos se basaban en el sabor y el olor de la tierra, otros en la existencia de hormigas: si hay muchas hormigas es señal de que el agua está cerca, pero si dichas hormigas son pequeñas y de color rojizo indican lo contrario.

Para conocer el desnivel existente entre nacimiento y manadero, Céspedes aportó instrumentos muy importantes. Él fue inventor de uno llamado Cuadrante Geométrico, que él llama «cuadrado». Explica la forma de construirlo, razona los cálculos en que se basa y enseña su uso.

Desde el punto de observación (él lo llama estación), se enfoca el punto cuya dimensión se desea conocer, a través de los orificios de las pínulas incluidas. Al estar el punto destino a nivel superior al de observación, habrá que inclinarlo hacia arriba, según la representación que vemos en el mismo instrumento, y el hilo del perpendicular dará el dato buscado.

Otro instrumento fue el Nivel de Tranco que Céspedes describe en su capítulos XII (fol. 12), XIII y XIV y Ardemans repite en su capítulo XII.

<sup>19</sup> IGNACIO RUIZ, «La tierra y sus aguas ocultas», *Hidrólogos y zahoríes*, Valencia, 935, Talleres Tipográficos La Gutenberg.



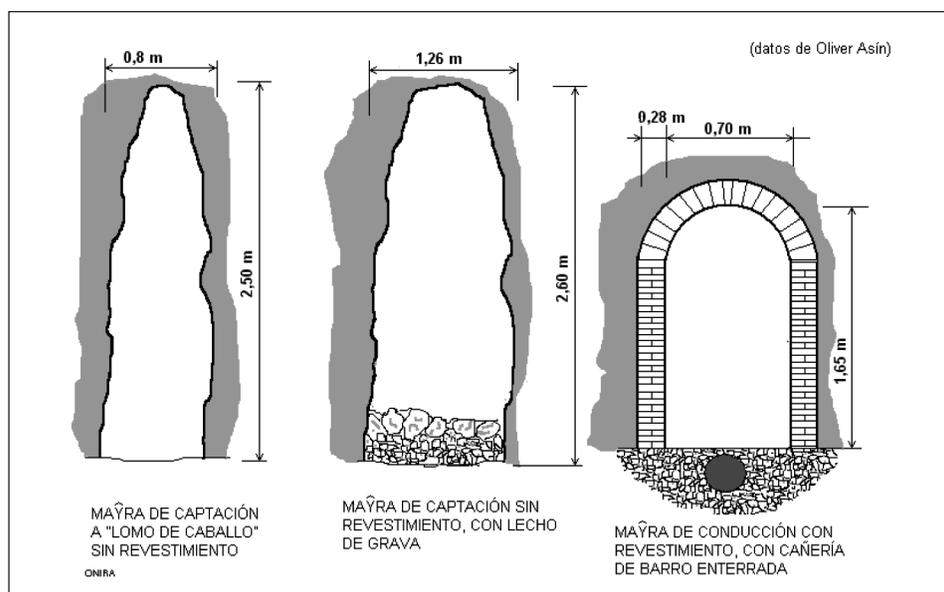
En puntos estratégicos (cambios bruscos de dirección) y en los de derivación, las galerías tenían intercaladas unas arcas de obra a modo de aljibe.

Un arca podía realizar varias funciones:

- arcas colectoras, donde afluyen las minas de drenaje;
- arcas de registro, visitables, para decantación de impurezas, al perder velocidad;
- arcas de distribución, donde comienzan las líneas de reparto del agua a los puntos de consumo;
- las arcas de aforo donde se ajusta el caudal a cada usuario particular y a las fuentes públicas.

Las minas y las galerías se construían desnudas o revestidas de obra, dependiendo de la naturaleza del terreno, siendo el revestimiento necesario cuando era previsto el posible desmoronamiento de paredes y techos por no estar el terreno suficientemente compactado. En cualquier caso, las minas de captación revestidas deberían serlo de manera que no impidiera el drenaje del agua.

El revestimiento de las galerías de conducción y reparto, al ser estanco, evitaba la contaminación del agua por elementos externos.



Al tratarse de terreno sobre el nivel freático, el agua debía discurrir en las galerías por canalización impermeable (cañería, canalillo de barro cocido o canal abierto), para evitar pérdidas de agua por filtración.

Esta canalización discurría por un lateral o por el centro de la galería, existiendo en todo caso un andén para el tránsito de personas sobre terreno seco. Ardemans, en un informe incluido al final de su libro, manifiesta que las pérdidas de agua por roturas de conducciones, por filtraciones y por robo ascendían al 50 por 100 de la captada.

En el caso de canalización por cañería, se requería una pendiente descendente para evitar la formación de bolsas de aire que serían origen de problemas de difícil solución.

Céspedes, en su tratado de conducir aguas (Caps. XVII y ss.), plantea cuatro casos que se pueden presentar al inicio del proyecto, sus inconvenientes, y dio el remedio para evitarlos. En todos ellos, el nacimiento se ha de encontrar a mayor nivel que el manadero.

«Un caso es cuando (1.º) el nacimiento se ve con evidencia que está más alto que donde ha de venir a manar y que no tiene que subir cuesta, después que esté en lo bajo: y en tal caso no hay para qué gastar tiempo en nivelar el camino. Púedese ofrecer otro caso que (2.º) el nacimiento del agua esté en una parte alta y que de allí tiene de bajar a un valle, y tornar a subir a otra parte alta, donde ha de ser el manadero. Otro caso se puede ofrecer que siendo (3.º) el nacimiento del agua en un valle: y el manadero ha de ser en otro valle, y entre el nacimiento y el manadero y una cuesta. También se puede ofrecer que (4.º) el nacimiento del agua sea en un llano y el manadero también está en el mismo llano y hay mucha duda cual de los dos lugares está más alto».

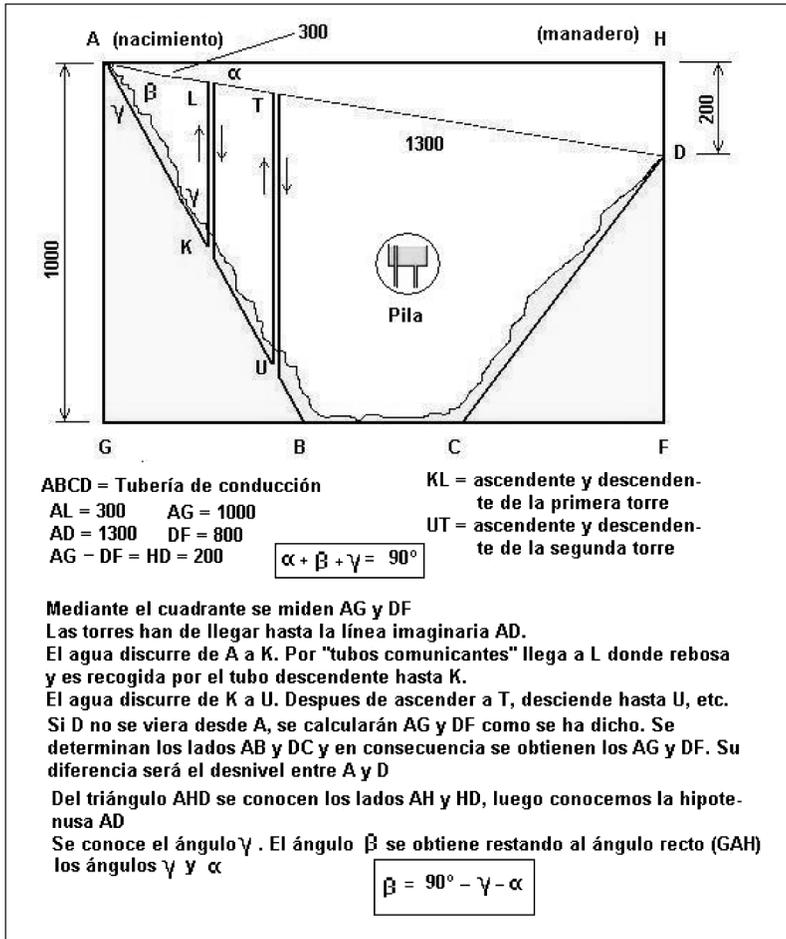
De estos cuatro casos nos centraremos, a modo de ejemplo y en forma resumida, en el segundo.

Si las características del terreno obligaran a realizar cambios de dirección, en cada codo se debe de hacer un arca para que descansa el agua, «porque de otra manera, si el camino fuese largo, serían causa los codos de que reventase la cañería». Si el recorrido fuese largo, aun sin cambios de direcciones, será bueno realizar las arcas, «que sirven de dos cosas. La una es que descansa el agua en ellas, y no trabaja tanto la cañería. La otra es que cuando por alguna causa cesase de correr el agua, por estas arcas se conoce luego en qué parte está el daño, y se remedia con facilidad, sin deshacer el edificio» (en el sentido de lo construido).

En el caso de que los itinerarios de bajada y subida fueran largos, se ha de poner en práctica el artificio que describe consistente en intercalar unas torres intermedias para lograr que con la encañadura ordinaria no revienten los caños por muchas partes impidiendo la llegada del agua al manadero. Céspedes lo razona con la longitud de la cañería (con la cantidad de agua contenida en ella), si referirse a lo que ahora llamamos altura manométrica (presión estática) que es la razón de dichos reventones.

En los codos de cambio de dirección se ha de situar una de estas torres.

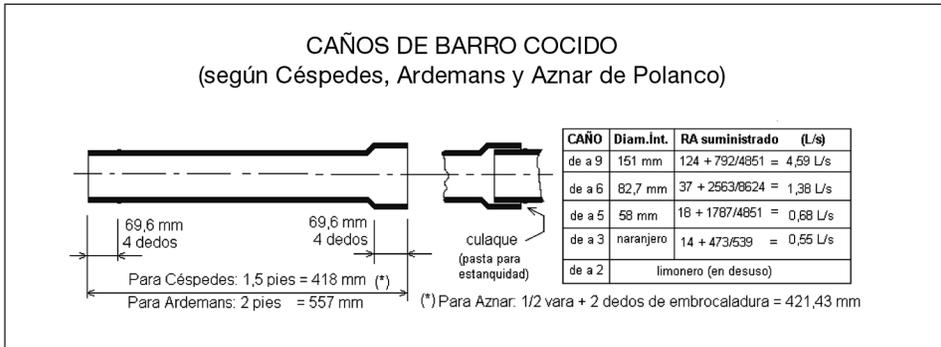
El agua mana por la parte alta de la torre, por la teoría de los tubos comunicantes, saliendo a la atmósfera. Después de ser recogida en una pila (ver figura), de donde torne a bajar por otra cañería hasta el pie de la torre, y de allí prosiga hasta la siguiente torre, y así sucesivamente hasta llegar al manadero.



Sugiere que en casos de valles hondos, para evitar la presión excesiva del agua en el fondo, se realice un acueducto sobre arcos. El desnivel entre nacimiento y manadero se tiene que repartir entre todas las torres según figura. También observa Céspedes que en casos de grandes caudales, «se lleve por dos caños, para repartir el peso, y los caños no tengan mas hueco de cuanto fuere menester».



siguiente tabla lo dicho por ellos. En su denominación intervenía el diámetro interior expresado en dedos.



Sobre los caños utilizados, nuestros autores casi coinciden en sus características. De ordinario los caños se hacían de barro cocido, vidriados por dentro (Aznar, que sabía poco del tema, decía sin vidriar), y de 2 dedos (34,8 mm) por lo menos de grueso, hechos a macho y hembra, cada uno de 4 dedos de largo (6,96 cm). En cuanto a su longitud, no se ponían de acuerdo. Ardemans menciona el caño de a 6, olvidándose de los de a 3 y a 5.

Se tienen que juntar con un cullaque, que se hace de cal y aceite (preferible de linaza) y estopas picadas, todo ello ha de ser muy bien masado y batido».

Conviene decir que en aquellos tiempos eran muy apreciados los objetos hechos con barro de Alcorcón.

De bronce se suelen hacer caños para donde el agua hace algún codo, y donde el agua hace fuerza y en los manaderos.

El diámetro interior se hará conforme al caudal a transportar, «de suerte que quepa por él descansadamente».

El asiento de los caños por la zanja, «será sobre tejas unas en bajo y otras encima de suerte que la una pegue con la otra, aplicadas con su cal y arena, y estas tejas cargará sobre piedra o ladrillo, asentada con cal y arena, así por la parte de arriba como por la de abajo y los lados. Todo esto se hará con la fortificación que fuere necesaria para la resistencia del agua».

La instalación de los caños se facturaba por los fontaneros, cada caño a 9 reales de vellón por vara lineal, incluido el guarnecido de fábrica de ladrillo.

Para construir un Viaje, Ardemans (Caps. VII y XIII) da consejos con vistas a asegurar su rentabilidad. Ante todo, manifiesta, se ha de tener garantizado el caudal de agua en el nacimiento antes de realizar las galerías que lo conduzcan a las fuentes (nacimientos)

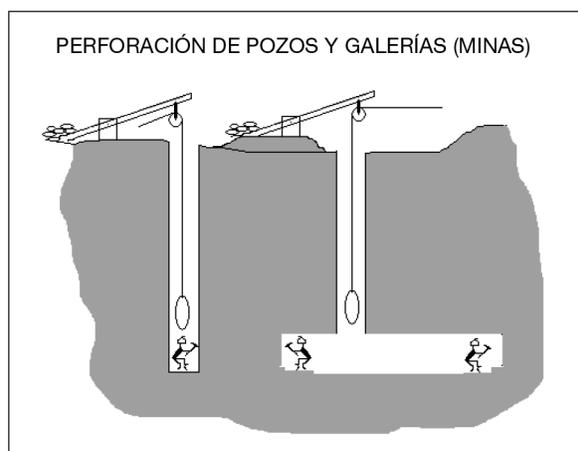
«porque nunca es bueno hacer el gasto en estas obras por los chascos que suelen resultar sin hacer todas las inquisiciones que hay que observar. No se deberá hacer toda la obra sino un pedazo de argea para formar un desaguadero. Comprobar comportamiento durante 3 años y si es positivo midiéndola periódicamente, se completara la obra».

Teniendo ya localizado el manantial, donde se vio «humear», allí se abrirá un pozo, donde se reconocerá a qué profundidad está el agua firme.

Además, recomendaba a los artifices y operantes que no se comprometieran a garantizar un caudal obtenible antes de realizar la obra, «pues de equivocarse, tras los costosos gastos, el dueño se sentiría burlado, acusándoles de ladrones».

El siguiente paso era analizar el agua en cuanto a su salubridad y calidad.

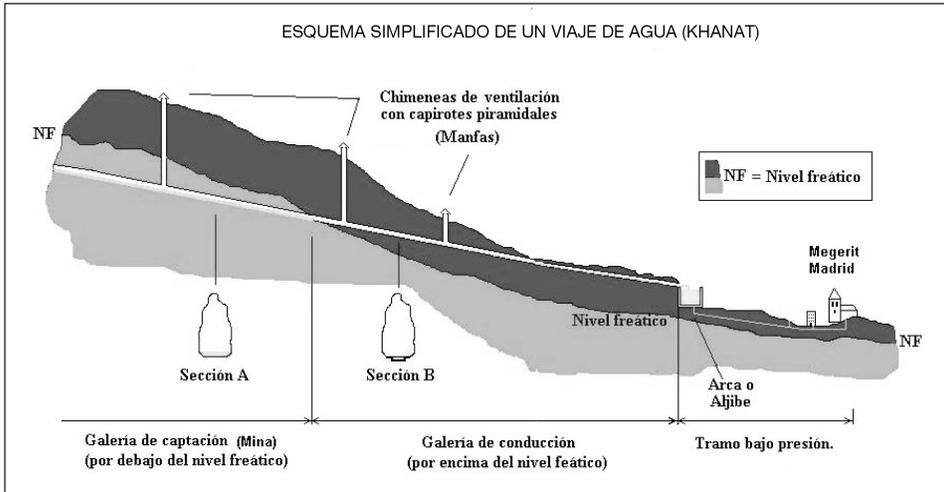
Sobre el lentejón localizado, se realizaban pozos artesianos y para aumentar la superficie de captación de agua, se perforaban minas<sup>20</sup>, según figura. Estas minas se unían entre sí formando lo que conocemos por zona o red de captación que terminaba en el arca principal.



Fundamental para la construcción de las galerías fueron las chimeneas, pues de ellas dependía la correcta nivelación de las galerías y minas. La pendiente necesaria se obtenía utilizando el nivel de tranco ya mencionado. La altura del pozo segundo era la del primero, menos el desnivel calculado.

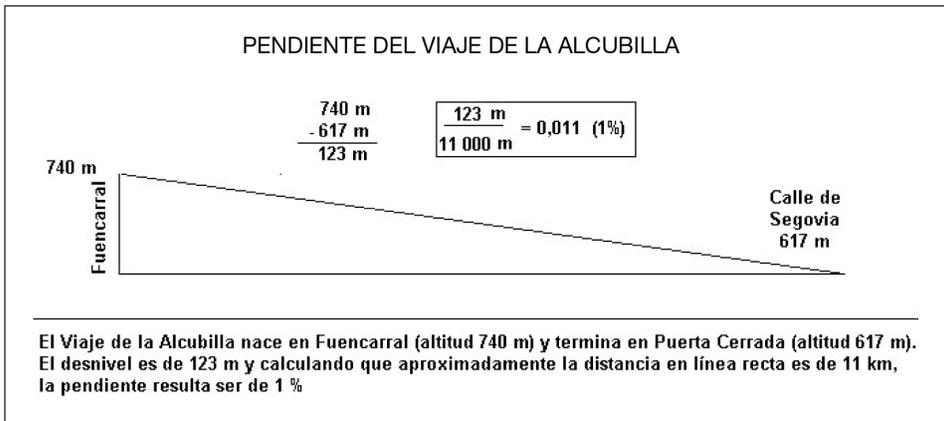
<sup>20</sup> Minas son galerías sensiblemente horizontales, situadas sus soleras bajo el nivel freático. Están en comunicación con un pozo. Tienen una ligera inclinación hacia el pozo para acumular en él el agua obtenida.

Eran necesarias las chimeneas para la extracción de lo excavado, para lograr una ventilación que garantizara el oxígeno imprescindible para la respiración del personal de mantenimiento del Viaje, y para airear el agua transportada.



Los nacimientos, origen de los viajes, se encontraban a una distancia de la urbe, entre 7 y 12 km.

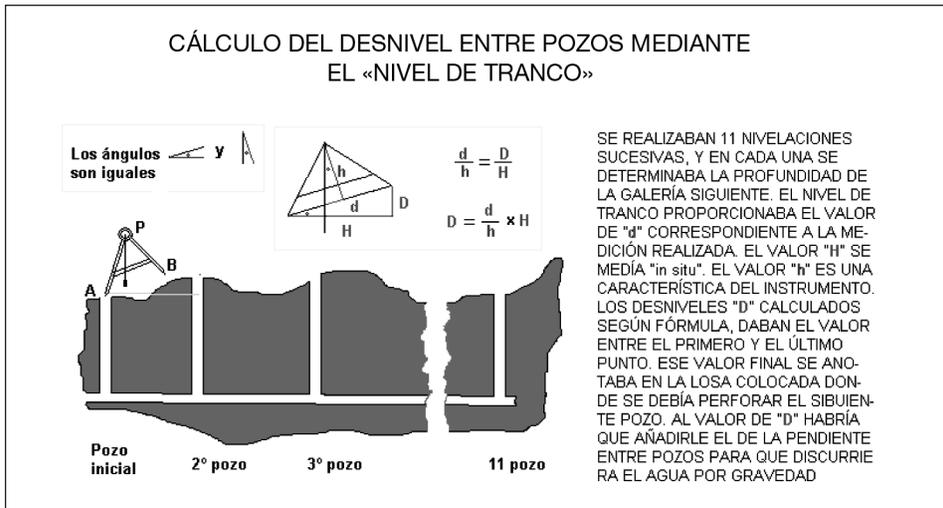
Siendo los desniveles a salvar de unos 70 a 120 m, se obtenía una pendiente próxima al 1 por 100, la necesaria para que el agua discurriera por gravedad.



Ardemans señalaba que después de recogida toda el agua en la primera arca, se proseguirá la galería de 7 pies de alto (1,95 m) y 3 de ancho

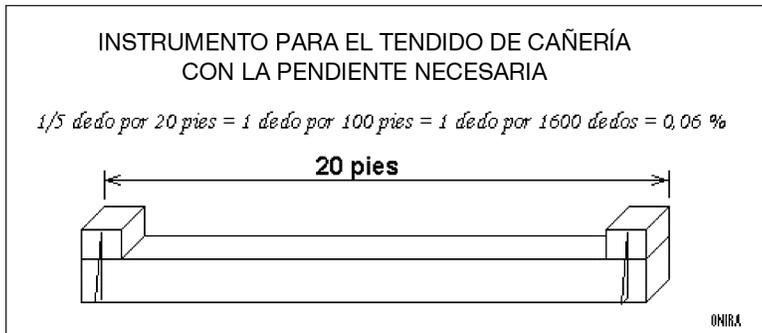
(0,84 m), suficiente para el paso de personal (valores diferentes a los dados por Oliver Asín).

Siguiendo la regla de las 11 nivelaciones, se irán abriendo cada tramo de mina de pozo a pozo.



Después de abrir un segundo pozo con el «renglón» que nos diseña Ardemans, se proseguirá la perforación sin desviarse hasta el siguiente pozo.

Según se avanza, se irá reconociendo la calidad del terreno. «Si el terreno es bueno no se necesita de vestir; si es feble [blando] es preciso vestirle de bóveda de albañilería de rosca con sus dos pies derechos dándole a éstos sus gruesos competentes así para fortificar el terreno como para que cargue la bóveda».



Una vez realizada la zona de captación, se continuaba por encima del nivel freático con las galerías de transporte y distribución a los puntos de

consumo, para su aprovechamiento con fines doméstico, sanitario, agrícola, artesanal, etc. Las galerías se construían siguiendo el mismo sistema descrito para las minas.

Se piensa que, en tiempos musulmanes, el procedimiento de realización de las minas era a la inversa del descrito. Utilizaban el Sistema Ascendente, consistente en perforar (tunelar) desde la boca del manantial (manadero), origen del arroyo, siguiendo la vena líquida. Este sistema sería el aplicado en el manantial del arroyo Matrice, posteriormente llamado Fuente de Sancti Petri. Posteriormente harían lo mismo con el arroyo del arenal y de Leganitos.

Gil Clemente, en su informe, nos dijo que el agua captada les servía de guía para la orientación y profundidad del trabajo, siendo los fontaneros quienes decían la última palabra, trabajando sin planos, y sin reflejar los resultados. Esta suposición es apoyada por el hecho de que se carece de los mismos. Este sistema pudo emplearse en los arroyos existentes en Madrid: Arenal, Castellana, Barquillo, Goya, San Bernardo, Los Reyes, Paseo de San Vicente, etc., que son tributarios del río Manzanares y del Abroñigal.

Ya en funcionamiento el Viaje, las chimeneas se tapaban para evitar la caída de objetos extraños que pudieran contaminar el agua o interrumpir su flujo, pero permitiendo siempre la ventilación. Uno de los sistemas empleados para ello fue la utilización de capirotes, piedras de forma troncopiramidal de unos 70 cm de alto por 80 cm de lado<sup>21</sup>. El capirote tiene un orificio lateral comunicado con la base para la ventilación de la chimenea.



Cuando la galería sufría un fuerte cambio de dirección, se colocaba un arca, llamándose entonces «Cambija»<sup>22</sup>. El motivo de su existencia era el evitar que la acción erosivadora del agua en dichos cambios de dirección socavara el terreno pudiendo producir hundimientos.

Siguiendo con sus consejos, Ardemans añade que no deben construirse las arcas bajo las chimeneas para evitar la caída de broza en su interior.

En aquellos tiempos las fuentes no disponían de grifo alguno, eran «a caño libre». Si un caño se taponaba, el agua se desviaba a otras derivaciones o rebosaba, si el caudal repartido llegara a ser inferior al recibido. No existían llaves ni contadores de consumo, como ahora. El particular pagaba por el agua que salía por un caño durante todo un año y no por el agua que «consumiera». La unidad de cantidad de agua transaccionada era el

<sup>21</sup> Según Pedro López Carcelén, estos capirotes de granito fueron colocados en el siglo xvii.

<sup>22</sup> Ardemans refiere en el capítulo XIV de su libro lo que se entiende por Cambija: arca donde el agua desemboca con un cierto ángulo para así templar su impulso.

ya mencionado «Real de Agua fontanero» que durante un año alcanzaba el valor de:  $365 \times 24 \times 3600 \times 0,037 = 1166,8 \text{ m}^3$ .

Cuando la red de distribución era por cañería, sistema similar al actual, y siendo los caños de barro, no se ponían llaves de corte, pues ello hubiera producido la rotura de la conducción, no resistente para soportar la presión estática, mayor a la dinámica existente.

La conducción por cañería requiere tener en cuenta aspectos básicos para el funcionamiento correcto del sistema:

- Se deberán evitar elevaciones seguidas de descenso (las Ues invertidas), porque la acumulación de aire en esos puntos llegaría a interrumpir el paso del agua.
- Tan sólo se podían utilizar llaves de corte y grifos tratándose de conducciones metálicas.
- La presión del agua en los puntos de toma dependerá del desnivel existente entre depósito y dicho punto. Conviene recordar que un desnivel de 10 m de agua, equivalen aproximadamente a una presión de 1 bar.
- En el caso de cerrarse algún grifo o llave, la presión dinámica alcanzaría el valor estático, superior; si el caudal entrante en el depósito nodriza fuera mayor a la suministrada a los usuarios, se elevaría el nivel pudiendo llegar a desbordarse. Para estos casos, estaban previstos los desagüaderos.

Disponiendo de suficiente presión en la red de distribución, se podían colocar surtidores verticales en las fuentes, alcanzando el chorro una altura dependiente de la altura manométrica (diferencia de nivel entre depósito y surtidor y de la pérdida de carga en la conducción).

Teodoro Ardemans (Cap. XIV) manifestó que «es necesario poner su tagea por donde ha de continuar la conducción del agua. Si se hallare en su camino otro manantial de agua buena se la añadirá al que estamos construyendo para aumentar su caudal; caso de ser de mala calidad, se la separará. La tagea se hará de dimensiones acorde con «el golpe de agua» (caudal máximo).

Para conseguir impermeabilizar el canal de las galerías «después que estén enrasadas las paredes, se buscarán unos lanchones de la misma piedra, que cojan el hueco de la tagea, y medio pie mas de cada lado, que lo demás del grueso se suple de la misma piedra, y se enchinará muy bien, para que cuando se le eche mezcla de cal, y arena encima, no se traspore nada abajo».

En las arcas de repartición, la caja ha de ser de piedra o plomo según figura adjunta. Allí se encuentran el caño principal, los del repartimiento y el del desagüadero<sup>23</sup>. Es «preciso que sean de plomo, porque es el metal más acomodado, tanto para manejarle, como para comprarle».

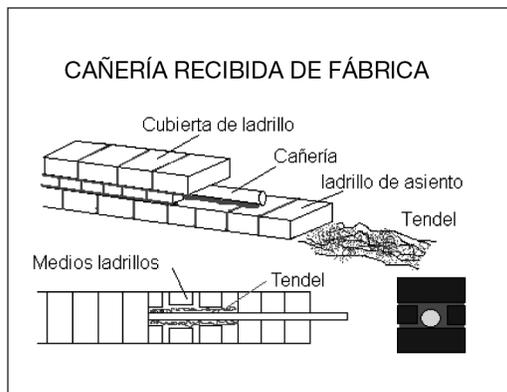
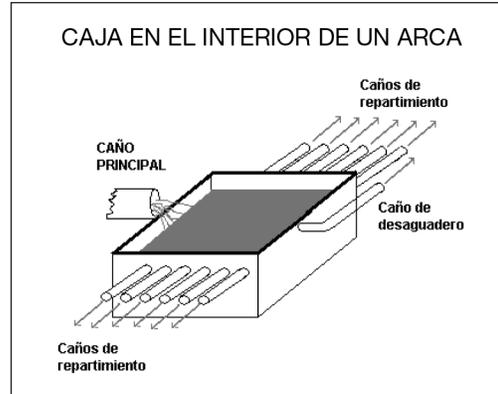
<sup>23</sup> El desagüadero es un rebosadero para cuando el caudal saliente fuera inferior al entrante. Esta agua sobrante se dirigía al exterior.

Sobre el material a emplear para los caños, observaba que el «de madera se pudre y presta mal color, olor y sabor al agua. El de plomo cría mucho légamo, y horrura. El de piedra cría mucha toba, y légamo. El de bronce es más limpio, pero no el más ligero para la bolsa». «La cañería de hierro vaciado dura poco, porque el moho del hierro la gasta muy presto, y cuesta mucho, pero no es tan perjudicial para la salud como la de otros metales, porque tiene su azufre, que es muy medicinal». «Si el viaje del agua va rápido, es necesario prevenir la cañería de barro más gruesa que la ordinaria, y que los codillos que hubiere de llevar en el discurso del viaje, ..., deban ser de piedra dura, para que tengan más fuerza, y resistan el ímpetu de su furor; y si el viaje viniere casi a nivel, que llamamos dormido, con cualquier cañería basta».

Para la unión de caños entre sí para formar la cañería, recomienda Ardemans al operante que «no ande escaso en el betún en los machiembrados de las cañerías de barro, y en el vestir de las de plomo con el angeo» (pasta de estanquidad). El betún de fontaneros se hacía mezclando cal, estopa y aceite.

Las cañerías se han de recibir de fábrica. «Para ello se preparará el mortero de cal, mezcla de cal y arena, en la proporción de dos espuertas de arena por una de cal. El ladrillo ha de ser de pinta y colorado. Se irá echando su tendel (capa de mortero) sobre la superficie del terreno, y colocando el ladrillo atravesado, si es cañería naranjera (que si es mayor, más ladrillo ha menester), después se van sentando los caños sobre el ladrillo, y si lleva tendel encima del ladrillo, será mucho mejor».

Después se le echa cal, y «se le va metiendo por los sobacos de los caños» (concavidad entre cañería y la hilada de ladrillos), y se le van acompañando con medios ladrillos o con cascote, y ya que está enrasado el caño, se le pone una cubierta de ladrillo.



Para que el tendido de la «cañería dilatada» (de gran longitud) sea correcto y no se desvíe, Ardemans aconsejó a los operantes la utilización de un instrumento «fácil y menesteroso», el representado anteriormente como «renglón»; de esa manera, la ejecución de la cañería, va «guiada con la cuenta, y razón que se necesita», porque la mayoría «se ejecutan, como dicen, a ojo, y por esta razón se han experimentado notables yerros», de difícil enmienda.

Con el «renglón» de 20 pies de longitud (5,57 m) al llevar plomadas en sus extremos, se puede hacer el tendido de la cañería con la pendiente calculada, «una quinta parte de un dedo<sup>24</sup>, y como se va sentando la cañería con el plomo, que cae sobre este declivio, resultará luego en cada cien pies un dedo de desnivel».

Si se quisiera mayor pendiente, se seguirá el mismo procedimiento, pues dándole otro tanto de declive, tendrá doblada porción (para 2/5 de dedo, se tendrá una pendiente de 0,125 dedos por 100 pies. De esta manera se realizará la cañería «sin garrotes, altos, ni baxos», como ordinariamente sucede.

Ardemans nos muestra cómo se ha de realizar el arca principal y el tendido de cañerías de distribución. Se medirá la distancia entre el arca principal y el manadero y mediante el Nivel de Tranco, el desnivel. Aconseja zigzaguear el tendido porque «de esta suerte se le temple la fuerza al impulso del agua, y las cañerías son más duraderas, de suerte que a cada 100 pasos se hará su cambija, para mayor descanso del agua».

Las cañerías serán de plomo, bronce o hierro, de fundición sin soldaduras, porque es por ellas, por donde suelen fallecer. Estas cañerías pueden ser también de piedra, que resultan más baratas. Independiente del material elegido, serán del diámetro necesario, según el caudal de agua a conducir, y del grosor que imponga la presión del agua, observando siempre que los codillos (codos y curvas para el cambio de dirección) han de tener paredes de mayor grosor que los caños, porque siempre «hace en ellos mas batalla el agua».

Caso de encontrarse con barrancos «será necesario hacer paredones o arcos» (acueductos) para el paso del agua, de mampostería o de albañilería con mortero de cal, o de piedra labrada, pero no de yeso «porque resultan perjudiciales».

Los pozos eran accesibles mediante escaleras desde la calle y desde casas particulares, pero se encontraban cerrados al público «mediante rejas con candados cuyas llaves custodiaba el maestro fontanero».

---

<sup>24</sup> Si cada 20 pies se obtiene un desnivel de 1/5 de dedo, a los 100 pies le corresponderá un declive de 1 dedo. La pendiente resultante será de 1 dedo cada 100 pies. De aquí salió la pendiente mínima del 1% que utilizan todos los autores que tratan este tema, cuando en realidad, la pendiente es del 0,0625%.

En la foto contigua la puerta de acceso a una galería del viaje de Amaniel (Caño Roto), recientemente descubierta en la calle de Juan XXIII.

Arnar describe los repartos de agua de unos viajes, indicando que a tal señor se le suministraba  $\frac{1}{2}$  RA «por la visita», queriendo expresar que dicho señor recibía gratuitamente el agua porque a través de su vivienda, el servicio de mantenimiento del Concejo tenía acceso a las galerías de dicho viaje.

Los pozos de ventilación son revestidos cuando la naturaleza del terreno así lo aconseja, llamándose entonces cascarones.



#### PÉRDIDA DE CARGA DE UNA CONDUCCIÓN DE AGUA POR CAÑERÍA

El rozamiento del agua a su paso por una tubería origina una pérdida de carga, lo que hace disminuir la presión disponible. Esta pérdida de presión es directamente proporcional a la longitud de la conducción e inversamente a su diámetro. Esto obliga a diseñar el diámetro de la conducción para el caudal previsto. Al parecer, este aspecto no era conocido suficientemente en tiempos del Real de Agua.

Para conducciones en un mismo plano, del mismo diámetro, conectadas al mismo depósito, el caudal disminuye cuando aumenta la longitud como consecuencia de la pérdida de carga. En el caso de que distaran lo mismo del depósito, pero se encontraran en distinto plano, el que estuviera a cota inferior recibiría mayor caudal.

La pérdida de carga en una conducción es función de  $L^m / D^n$ , siendo L y D la longitud y el diámetro del tubo, y m y n valores propios para el agua. Sean estas: Pa y Pb.

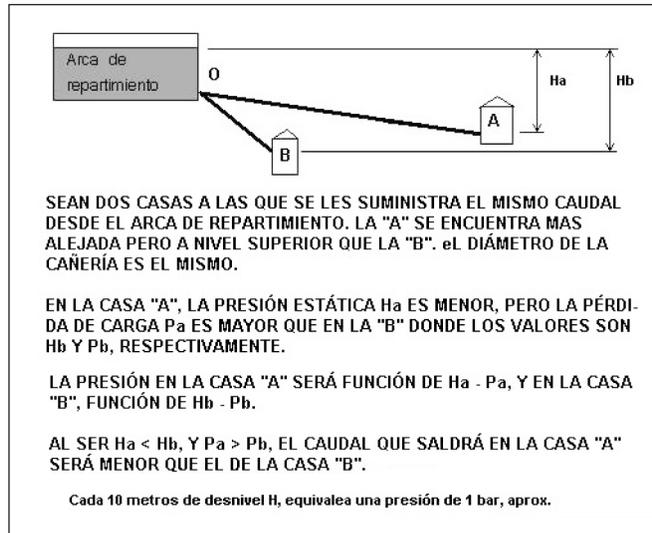
La presión disponible en cada punto de consumo es función del desnivel entre el arca y el caño considerado. Sean estas: Ha y Hb.

La presión en los puntos de consumo será la presión disponible menos la pérdida de carga.

Para el usuario A:  $H_a - P_a$

Para el usuario B:  $H_b - P_b$

A igualdad de sección de la cañería, la velocidad de salida del agua será proporcional a la presión del agua en ese punto. Siendo las secciones de las tuberías iguales, dicha velocidad dependerá exclusivamente de la presión. El caudal obtenido dependerá de la velocidad y, por tanto, de la presión en el caño.



Se da la paradoja de que 1 RA de la casa «A» es menor (tiene menor caudal) que el de la casa «B». Para garantizar el mismo caudal en los caños de diferentes usuarios que hubieran contratado la misma dotación, habría que diseñar el diámetro adecuado a las conducciones o ajustar los caudales mediante reguladores o detentores (en el argot de fontanería).

#### LOS CÁLCULOS DE ARNAR DE POLANCO

La lectura del libro de Arnar de Polanco es muy entretenida. El no disponer del sistema métrico decimal, hace que sus cálculos resulten farragosos. «Saber de cuentas» en aquella época, era cosa propia de bachilleres y de gente muy preparada.

Sorprende el que un mero profesor de matemáticas elementales, fuera autor del único trabajo existente sobre cálculos numéricos y geométricos relacionados con los viajes. Los errores advertidos en el texto y el que el autor no hubiera trabajado en el campo de la fontanería, hace suponer que fuera un mero expositor de los conocimientos de una tercera persona o se limitara a recopilar la documentación de la Junta de Fuentes. Todo ello apoyado en que Arnar describe tan sólo los viajes propiedad del Concejo.

Los cálculos realizados por Arnar de Polanco se realizan utilizando números quebrados, pues entonces no estaba en vigor el sistema decimal (se introdujo en 1886). Ello complica seriamente conocer su contenido. El sistema internacional, en vigor actualmente en la CE, fue declarado legal en la segunda mitad del siglo xx.

Las equivalencias utilizadas entre las unidades de longitud, de superficie, de volumen y de masa, son las siguientes:

## LONGITUD

	<i>Vara</i>	<i>Codo</i>	<i>Pie</i>	<i>Palmo</i>	<i>Pulgada</i>	<i>Dedo</i>	<i>Línea</i>	<i>SI</i>
Vara	1	2	3*	4*	36	48	432	0,835905 m*
Codo	1/2*	1	3/2	2	18	24*	216	0,4179525 m
Pie <sup>tercia</sup>	1/3	2/3	1	4/3	12*	16	144	0,278635 m*
Palmo <sup>cuarta</sup>	1/4	1/2*	3/4	1	9	12*	108	0,20897625 m*
Pulgada	1/36	1/18	1/12	1/9	1	4/3	12*	23,21958333 mm
Dedo	1/48	1/24	1/16	1/12	3/4	1	9*	17,4146875 mm
Línea	1/432	1/216	1/144	1/108	1/12	1/9	1	1,934965277 mm

## ÁREA

	<i>Vara</i> <sup>2</sup>	<i>Pie</i> <sup>2</sup>	<i>Pulgada</i> <sup>2</sup>	<i>Dedo</i> <sup>2</sup>	<i>SI</i> (m <sup>2</sup> )
Vara <sup>2</sup>	1	9	1296	2304	0,69873716
Pie <sup>2</sup>	1/9	1	144	256	0,07763746
Pulgada <sup>2</sup>	1/1296	1/144	1	16/9	5,3912 cm <sup>2</sup>
Dedo <sup>2</sup>	1/2304	1/256	9/16	1	3,0324 cm <sup>2</sup>

Arroba de agua = 16,133 litros

## VOLUMEN

	<i>Vara</i> <sup>3</sup>	<i>Pie</i> <sup>3</sup>	<i>Pulgada</i> <sup>3</sup>	<i>Dedo</i> <sup>3</sup>	<i>SI</i> (litros)
Vara <sup>3</sup>	1	27	36 <sup>3</sup>	48 <sup>3</sup>	584,07789
Pie <sup>3</sup>	1/27	1	12 <sup>3</sup>	12 <sup>3</sup>	21,63251
Pulgada <sup>3</sup>	1/46656	1/1728	1	2,370370	0,012518815
Dedo <sup>3</sup>	1/110592	1/4096	0,421875	1	0,005281375

## MASA

	<i>Quintal</i>	<i>Arroba</i>	<i>Libra</i>	<i>Adarme</i>	<i>SI</i>
Quintal	1	4	100*	25600	46,0093 kg
Arroba	1/4	1	25*	6400	11,502325 kg
Libra	1/100*	1/25	1	256	0,460093 kg
Adarme	1/25600	1/6400	1/256	1	1,797237 g

El caudal en una conducción es el producto de la sección por la velocidad. Sea una cañería donde el agua se desplaza a 1 m/s y otro donde la velocidad fuera de 1,5 m/s. Supongamos que tomamos agua a través de un caño de 1 cm<sup>2</sup> de área en cada uno de las cañerías.

El caudal en el primer caño será:

$$Q_1 = 1 \text{ cm}^2 \times 100 \text{ cm/s} = 100 \text{ cm}^3/\text{s} = 0,10 \text{ L/s} = 6 \text{ L/min}$$

El caudal en el segundo, será:

$$Q_2 = 1 \text{ cm}^2 \times 150 \text{ cm/s} = 150 \text{ cm}^3/\text{s} = 0,15 \text{ L/s} = 9 \text{ L/min.}$$

En las arcas de medición, el agua se almacena para que su velocidad sea cero, lo que los fontaneros llamaban agua dormida. El nivel del agua debe quedar muy próximo al borde superior del caño con el fin de que no influya la presión estática; de esta forma, la velocidad de salida será la misma en todos los casos y las mediciones realizadas coincidirán para una misma área del caño

El RA se subdividió en medio real, en cuartillos y en medio cuartillo. Los cuartillos se dividían en pajas.

Arnar define el RAF como el caudal que vierte un orificio que tiene por área la de la moneda de medio real de plata segoviano, y por diámetro exactamente 7/9 de dedo. Se ha llegado al acuerdo de evaluarlo así: 1 RAF = 3 pulgadas<sup>3</sup>/s (0,037 L/s).

Para mejor hacerse a la idea de qué caudales eran corrientes en aquella época, recordemos que un grifo del bidet suele suministrar hasta 5 L/min, que un grifo de fregadero, hasta 10 L/min, y que el grifo de la bañera ronda los 13 L/min, al menos en la práctica. Si aplicando las equivalencias correspondientes, pasamos estos tres caudales de L/min a L/s, obteniendo los valores de: 5/60 = 0,08333 L/s (2,25 RA): 10/60 = 0,1666 L/s (4,5 RA); 13/60 = 0,21666 L/s (5.85 RA).

#### OPERACIONES CON CIRCUNFERENCIAS Y CÍRCULOS

En tiempos de Arnar de Polanco, para expresar al número pi ( $\pi = 3,14159\dots$ ), utilizaban la fracción  $22/7 = 3 + 1/7$  (decimalizándolo, = 3,142857), algo superior al valor real. Servía para cálculos poco exactos. A este valor lo llamaremos «constante». Una fracción propuesta por Adriano Motio,  $355/113 = 3 + 16/113 = 3,141592$  es mucho mas exacta, aunque seguía siendo ligeramente superior al verdadero.

Las fórmulas que en la actualidad se utilizan para el cálculo de la longitud de la circunferencia ( $Lc = D \times \pi$ ), y del área del círculo ( $Ac = 1/4 \times \pi \times D^2$ ) no eran empleadas en aquellos tiempos, sino que solían utilizar la regla de

tres, que se establecía diciendo: si a una longitud de 22 le corresponde un diámetro de 7, a una cierta longitud  $L_c$ , le corresponderá  $D = L_c \times 7 / 22$ .

A las dificultades normales ocasionadas por el sistema no decimal utilizado, había que añadir el que utilizaban incorrectamente sus unidades, olvidaban señalar el cuadrado o el cubo al hablar de superficies o volúmenes.

Para calcular todo lo relacionado con la moneda Real de a 8 segoviano, Arnar la definía por un área de círculo de  $A_c = 3 + 65/81 = 308/81$  dedos cuadrados. En base a este dato, se deducen los valores del diámetro y de la longitud de la circunferencia. Utiliza como unidad el dedo (dd).

Partiendo de la fórmula:  $A_c = 11/14 \times D^2$ , y despejando el valor de  $D$ , obtenía:

$$A_c = \frac{308}{81} = \frac{11}{14} \times D^2; \quad D^2 = \frac{308 \times 14}{81 \times 11}; \quad D = \sqrt{\frac{308 \times 14}{81 \times 11}} = \frac{14}{9} \sqrt{2} \approx 2 + 1/5; \quad (2,1998877)$$

El diámetro calculado es:

$$D = 2 + 1/5 = 11/5 \text{ dd} \quad (2,2 \text{ dd})$$

Como comprobación, el área será:

$$A_c = 11/14 \times D^2 = 11/14 \times 308/81 \times 14/11 = 308/81 = 3 + 65/81 \text{ dd}^2 \quad (3,8 \text{ dd}^2)$$

La longitud de la circunferencia valdrá:

$$L_c = 22/7 \times D = 22/7 \times 11/5 = 242/35 = 6 + 32/35 \text{ dd} \quad (6,9 \text{ dd})$$

Aunque el valor de  $D$  es 2,199..., se admite convertirlo en 2,2 para poderlo descomponer en  $2 + 1/5$ .

En el libro de Arnar de Polanco se ha detectado otro error que de no advertirlo el lector, le conduciría a falsas conclusiones. Se trata del texto siguiente tomado de la página 230:

El libro de Aznar dice textualmente: «treientos y ochenta y un abos, que son tres dedos cuadrados, y sesenta y cinco ochenta y un abos de dedo».	El libro debió decir: «treientos <b>y ocho</b> , ochenta y un abos, que son tres dedos cuadrados, y sesenta y cinco ochenta y un abos de dedo».
---	--

El texto completo se encuentra en el Capítulo VI del libro «Aritmética inferior...»:

«El origen de donde sale la medida del que llaman real de agua es el círculo y área que ocupa el real de a 8 segoviano; pues teniendo como tiene fijamente de área trescientos y ochenta y un abos (1/381, en vez de

$308/81$ )<sup>25</sup>, que son 3 dedos y  $65/81$  de dedo (se olvida mencionar que son dedos cuadrados), que este quebrado dicho (se refiere al  $65/81$ ), es  $4/5$  y  $1/405$  de dedo (cuadrado) y tiene de diámetro 2 dedos y casi  $1/5$  de dedo, pues buscando el área con el diámetro dicho sale  $1331/250$ , que es más que el área de los  $308/81$  y  $11/3835$  y tendrá de circunferencia 6 dedos y  $32/35$  de dedo».

Por este orificio, según Arnar de Polanco, pueden salir 8 RAF «cabales». Respecto al realillo segoviano de 8 cuartos:

Su diámetro vale:

$$D = 7/9 \text{ de dedo} \quad (0,77 \text{ dd})$$

La longitud de la circunferencia será:

$$L_c = \pi D = 22/7 \times 7/9 = 22/9 = 2 + 4/9 \quad (2,44 \text{ dd})$$

El área correspondiente será:

$$A_c = 11/14 \times (7/9)^2 = 77/162 \quad (0,4753086 \text{ dd}^2)$$

Estos valores se pasan al sistema internacional utilizando los factores de conversión:

$$\begin{aligned} D &= 7/9 \times 1,74146875 = 1,3544755 \text{ cm} \\ L_c &= 22/9 \times 1,74146875 = 4,2552066 \text{ cm} \\ A_c &= 77/162 \times 3,0324 = 1,4240893 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Por este orificio puede salir, según Arnar, 1 RAF, a caño lleno.

Estos cálculos los repite Arnar para el resto de las monedas usuales. De ellos sacamos las siguientes conclusiones:

- El valor del diámetro, según el método propuesto por Arnar, es de 0,38888 dedos, pero Arnar dice valer casi  $3/7 = 0,42857$ , valor que no se considera similar al calculado.
- El valor erróneo  $3/7$  se emplea a continuación para el cálculo de la longitud de la circunferencia, por lo que éste valor tendrá que salir también equivocado en exceso. Con  $D = 3/7$ , se obtiene  $L_c = 66/49 = 1 + 17/49$ .
- El valor de la longitud de la circunferencia, según el sistema propuesto por Arnar, es de 1,2221942, que comparado con el que él considera  $L_c = 66/49 = 1,3469387$ , son sensiblemente diferentes.

Para pasar estos valores al sistema decimal, pasamos la cantidad en números quebrados, a decimal y lo multiplicamos posteriormente por el factor de conversión correspondiente, siendo éstos:

<sup>25</sup> Parece que aquí correspondería la cantidad de  $308/81$ .

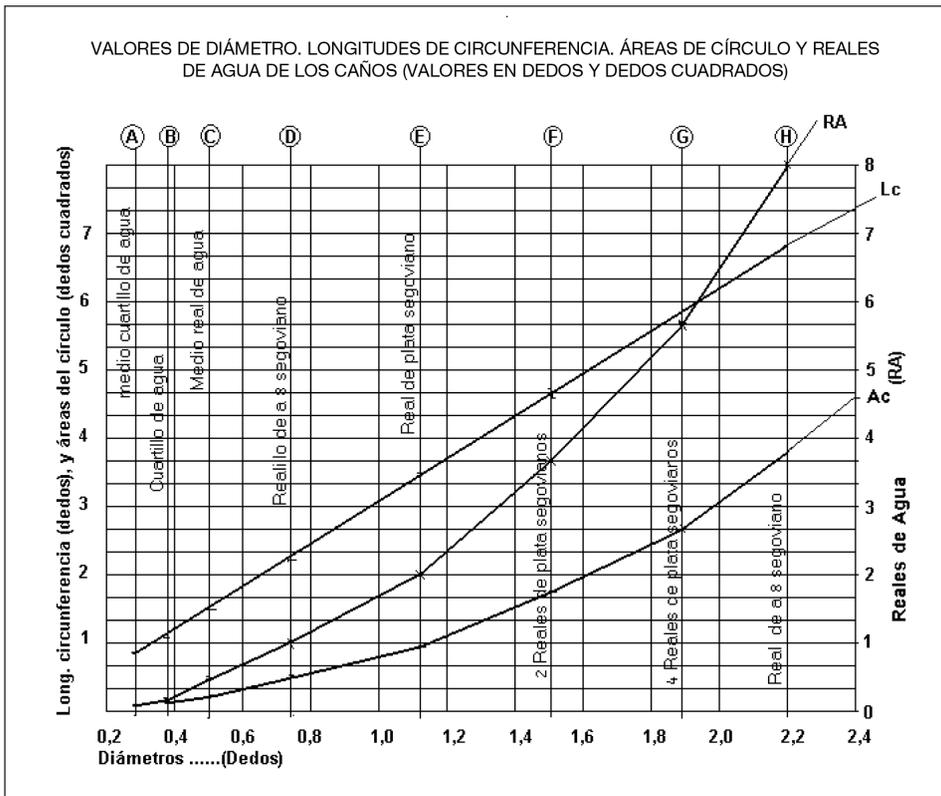
Para el diámetro y la longitud de la circunferencia:

$$1 \text{ dedo} = 1,74146875 \text{ cm}$$

Para el área del círculo:

$$1 \text{ dedo cuadrado} = 3,0327132 \text{ cm}^2$$

Como resumen de los cálculos, los representamos tabulados:



**RESUMEN DE DATOS CALCULADOS Y SU EQUIVALENCIA EN EL SI**

	A	B	C	D	E	F	G	H
	<i>1/2 cuartillo de agua</i>	<i>Cuartillo de agua</i>	<i>Medio real de agua</i>	<i>Realillo 8 cuartos</i>	<i>Real plata</i>	<i>2 reales plata</i>	<i>4 reales plata</i>	<i>Real de a 8 segoviano</i>
D	...2/7	...3/7	...4/7	7/9*	1+1/8*	1+1/2*	1+7/8*	2+1/5
	0,2749858	0,38888	0,54997	0,77777	1,125	1,5 1,875	2,2	
	0,4788 cm	0,6770 cm	0,9577 cm	1,3544 cm	1,9591 cm	2,6122 cm	3,2652 cm	3,8312 cm

## RESUMEN DE DATOS CALCULADOS Y SU EQUIVALENCIA EN EL SI (Continuación)

	A	B	C	D	E	F	G	H
	<i>½ cuartillo de agua</i>	<i>Cuartillo de agua</i>	<i>Medio real de agua</i>	<i>Realillo 8 cuartos</i>	<i>Real plata</i>	<i>2 reales plata</i>	<i>4 reales plata</i>	<i>Real de a 8 segoviano</i>
Ac	77/1296*	77/648*	77/324*	77/162 (+)	891/896	1+43/56	2+683/896	3+65/81*
	0,059	0,1188271	0,23765	0,4753086	0,9944196	1,7678571	2,7622767	3,8024 (+)
	0,1801 cm <sup>2</sup>	0,3603 cm <sup>2</sup>	0,7207 cm <sup>2</sup>	1,4414 cm <sup>2</sup>	3,0157cm <sup>2</sup>	5,3608 cm <sup>2</sup>	8,3763 cm <sup>2</sup>	11,5306 cm <sup>2</sup>
Lc	...4/49	1+17/49	...1,7959	2+4/9	3+15/28	4+5/7	5+25/28	6+32/35
	0,864241	1,346938	1,7284771	2,444	3,5357142	4,71428	5,8928	6,914
	1,50504 cm	2,3456 cm	3,01008 cm	4,25520 cm	6,1573 cm	8,2097 cm	10,262 cm	12,0410 cm
RA	1/8	1/4	1/2	1	2	3+5/8	5+3/4	8 (+)

(+) Las áreas del real de a 8 y del realillo de 8 cuartos están en la proporción de 8 a 1, por lo que Arnar de Polanco manifiesta que los RA guardan esa misma relación.

D = Diámetro; Ac = Área del círculo; Lc = Longitud de la circunferencia; RA = Real de Agua

### CAUDALES DE AGUA Y SU MEDICIÓN<sup>26</sup>

#### *Caudalímetros (hidrómetros)*

El agua que discurría en los «Viajes» o salía de una fuente, se medía antiguamente con un instrumento graduado en reales de agua (RA), llamado «Marco de Madrid». La medición se realizaba haciendo pasar el agua por sus caños a vena completa<sup>27</sup>, lo que se entendía por «chorro sólido».

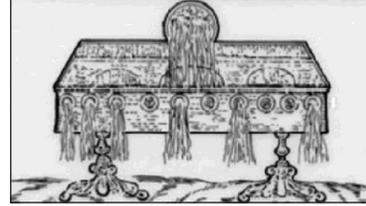
El Marco de Madrid consistía en una caja de metal abierta por arriba. En su frente llevaba dispuestos una serie de caños de corta longitud, pero de diferentes diámetros, situados tangentes a una línea horizontal, de forma que su borde superior quedaran a un mismo nivel. En la representación ofrecida en el libro de Ardemans, los caños aparentan ser todos del mismo diámetro pero en la realidad, debían ser diferentes.

El agua del manantial o de la fuente entraba por el orificio del fondo, y salía por los caños frontales dispuestos para ello. El sistema consistía en llenar la caja y mantener el nivel constante, dejando tan sólo abiertos los caños

<sup>26</sup> Datos tomados de los libros de Teodoro Ardemans y de Arnar de Polanco, señalados en la bibliografía.

<sup>27</sup> Consistían en un tabla de hoja de lata, latón o barro, en la que habían caños de distintos diámetros, uno de los cuales daba la medida; aquel por el que saliera perfectamente ajustado el caudal de agua.

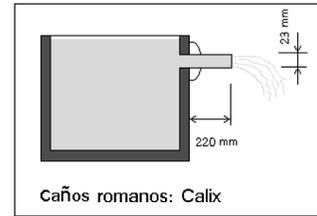
necesarios para conseguirlo. Así salía tanta agua como entraba. Si se apreciaba que el nivel ascendía se debía cerrar un caño para abrir otro de sección mayor, y a la inversa. Los orificios a abrir se elegían gracias a la maestría del fontanero que no tardaría en acertar con la composición correcta.



Estabilizado el nivel, bastaba con ir sumando los RA de los caños que estaban abiertos para conocer el número total de RA que producía el manantial. Importante es, advierte Arnar de Polanco, que el nivel del agua debe alcanzar siempre al mismo nivel, no más de 1 dedo sobre el caño, para que la velocidad de salida no aumente y evitar con ello que aumente el caudal.

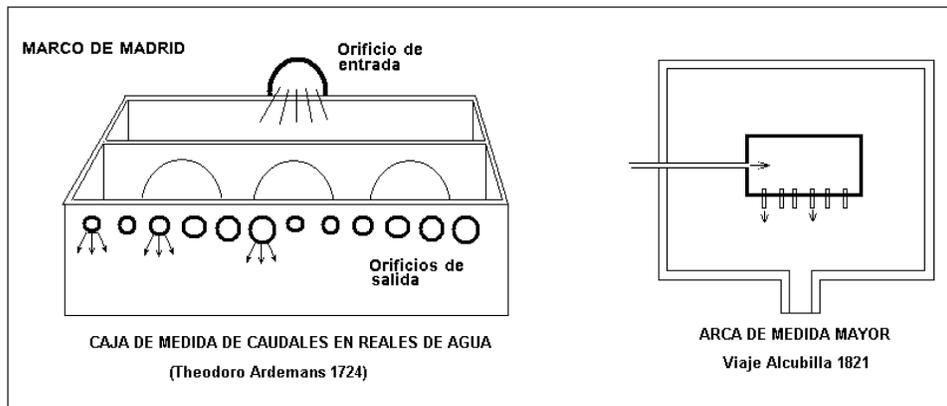
Según T. Ardemans este sistema es «exactísimo», pero tiene el inconveniente de «que solo sirve para una cantidad limitada que no sea de mucha consideración».

Arnar advierte de la picardía utilizada a la hora de medir los caudales pero no menciona que utilizando un caño cónico hacia fuera, se produce un aumento de la velocidad y por lo tanto de caudal. Este truco era conocido en época romana, el calix, y llegó a estar penalizado su uso.



T. Ardemans aconsejaba el modo de hacer las cajas para medir el agua en las arcas:

«Esta se hará grande cuando se pueda medir 60 reales de agua y se pueden medir hasta 120 y otras menores y mas normales y para que duren mucho es bueno que sean de cobre y también se hacen de hoja de lata, de modo que se las da la medida según los reales de agua que quisiere el artifice, advirtiendo que se componen de 4 paredes y un suelo y de medio a medio lleva



una pared tan alta como las otras y con unos arquillos en ella para que pase por ellos el agua al claro donde están los caños de la medida...».

Arnar de Polanco describe así el sistema seguido para hacer una medición del caudal:

«Quando se ofrece querer averiguar el agua que trae qualquier viage, se mandan hacer diferentes caños de latón, Hoja de Lata, Barro u otra cosa semejante, de modo que sean los círculos de diferentes espacios, y se prueba, y mira el círculo por donde sale el caudal de Agua ajustado, y luego para saber los reales de agua que salen por él, se medirá el hueco que tiene el diámetro, y multiplíquese por 3 y 1/7, saldrá la (longitud de la) circunferencia multiplíquese por el diámetro, y de lo que procede sáquese la quarta parte, la qual será el área que tiene el dicho círculo, con la que se podrá ordenar la regla de tres.

$$Lc = D(3+1/7) = 22/7 \times D; A = 1/4 Lc \times D$$

«Si se tomase la circunferencia del hueco del dicho círculo, sígase con ella la regla de tres, diciendo:

Si 22 de circunferencia dan 7 de diámetro, la circunferencia hallada que tendrá?».

«Sígase la regla, multiplicando la dicha circunferencia por 7 y lo que procede pártase por 22, y saldrá el diámetro.

«Hágase la misma operación dicha multiplicando el diámetro por la [longitud de la] circunferencia, y de su producto sáquese la quarta parte, y será el área que tiene el referido círculo».

Como unidad se utiliza el dedo para los diámetros y longitudes de las circunferencias, D y Lc, y el dedo cuadrado para el área de los círculos, A.

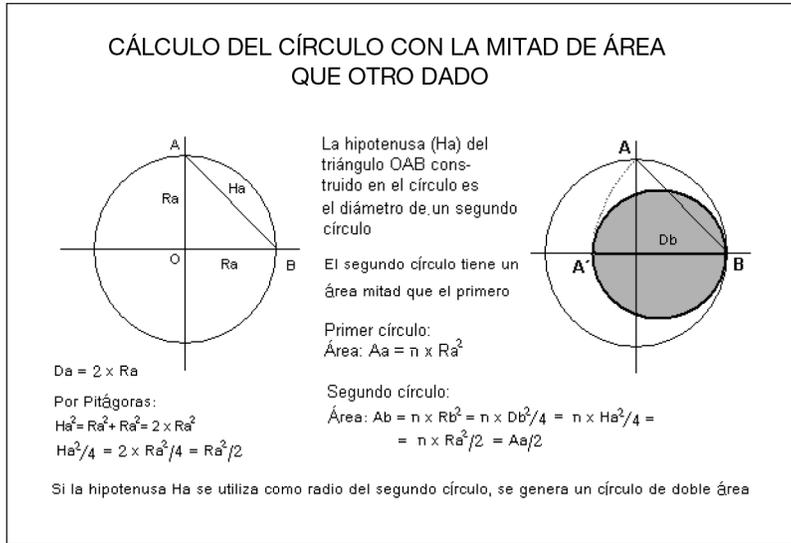
Se observan diversos errores de cálculo generalizados cuando Arnar elige los números quebrados.

Las mediciones de los caudales de agua se realizaban dos veces al año, generalmente en primavera y otoño, para saber el aumento y disminución que *habían* experimentado los viajes.

REGLA PARA DOBLAR, TRIPLICAR, ETC., LAS ÁREAS DE CÍRCULOS Y CUADRADOS EN LA PROPORCIÓN DESEADA, PARA SABER LOS RA QUE PODRÁN SALIR POR CADA UNO DE ELLOS (Arnar lo expone en el capítulo VII de su libro)

Primero dibuja un círculo L de radio Ra, mediante compás, siguiendo las indicaciones de Arnar de Polanco reflejadas en la figura 1. El círculo L corta a los ejes perpendiculares en los puntos A y B. Unidos dichos puntos

por una recta, se obtiene la hipotenusa  $H_a$  del triángulo rectángulo cuyos catetos son el radio del orificio ( $R_a$ ), según figura 2.



Para hallar el círculo por donde salga doble caudal que en el anterior, en este caso dos reales de agua, tírese la línea hipotenusa ( $AB$ ), «la que será *diámetro* del círculo que se pide».

Aquí se vuelve a equivocar Arnar de Polanco, pues dice que la hipotenusa será diámetro, en vez de decir radio. Si se utiliza como diámetro, el círculo resultará tener la mitad de área y no el doble que el inicial. La hipotenusa como radio origina doble área, y como diámetro, la mitad.

En la figura 2, la hipotenusa se abate sobre el eje horizontal y se utiliza como diámetro ( $A'B$ ) de un segundo círculo, el área de éste,  $A_b$  (sombreada), será la mitad que la del primer círculo y no el doble como manifiesta Arnar de Polanco.

Demostración de lo dicho:

- El área del primer círculo ( $A_a$ ) vale:

$$A_a = \pi \times R_a^2$$

- El área del segundo círculo ( $A_b$ ) vale:

$$A_b = \pi \times R_b^2 = \pi \times D_b^2/4 = \pi \times H_a^2/4 = \pi \times R_a^2/2 = A_a/2$$

En el caso particular de que el círculo inicial fuera el orificio por donde sale 1 RA, el de una moneda de medio real de plata segoviano, según la aplicación que se le de a la hipotenusa, se tendrá:

- Si la hipotenusa se utiliza como diámetro de un segundo círculo, éste tendrá un área mitad que el primero y saldrá la mitad del caudal ( $\frac{1}{2}$  RA).
- Si la hipotenusa se utiliza como radio de un segundo círculo, éste tendrá un área doble que la del primero, y saldrá doble caudal (2 RA).

Arnar representó los círculos obtenidos geoméricamente mediante la figura contenida en la lámina 2 del libro. La lámina se reproduce a continuación.

Arnar lo expone así:

«Para hallar el círculo por donde salgan dos reales de Agua, tírese la línea Hipotenusa que es la recta, opuesta al ángulo recto, la qual será *diámetro* del círculo que se pide, como el círculo 2».

En esta frase, Arnar de Polanco comete un error, pues al ser dicha hipotenusa menor que el diámetro del círculo inicial, su área será también menor, no pudiendo ser el doble. El error es que utilizó la palabra diámetro debiendo decir semidiámetro o radio. El texto debiera ser el siguiente:

«Para hallar el círculo por donde salgan dos reales de Agua (el doble que en el primero), tírese la línea Hipotenusa, que es la recta, opuesta al ángulo recto, la qual será *radio* del círculo que se pide, como el círculo 2».

El texto original prosigue así:

«y para hallar el círculo por donde corran, y salgan 4 reales de Agua, tírese la línea Hipotenusa 1 y abrase el compás su largueza y sentado en el ángulo recto (centro del círculo), se describirá el círculo que señala el 4».

«y para formar el círculo por donde puedan salir 8 reales de Agua, tírese la Hipotenusa tercera, y abrase el compás su distancia, y sentado en el ángulo recto se describirá el círculo que señala el 8».

«Asimismo para hallar el círculo por donde puedan vaciar 16 reales de Agua, se tirará la línea Hipotenusa quarta, y abriendo el compás su distancia se sentará en el ángulo recto, y se describirá el círculo 16».

«y para hacer el círculo por donde salgan 32 reales de agua, se formará la hipotenusa quinta, y con el compás abierto su largo desde el ángulo recto, se describirá el círculo 32».

«y lo mismo se hará para hallar el círculo por donde vacían 64 reales de agua, y por esta regla se pueden saber los reales que pueden salir por otros círculos, que estén en la proporción dupla explicada».

Como se comprueba, en todos los casos, menos en el erróneo inicial, la hipotenusa se utiliza como radio del círculo siguiente, el que tiene doble área que el anterior.

Para reducir las áreas en submúltiplos, Arnar de Polanco dice que se sigue el mismo sistema, pero tomando la hipotenusa anterior como diámetro y no como radio del nuevo círculo. El texto es el siguiente:

«De la misma línea hipotenusa que sirve de regla para doblar círculos y cuadrados<sup>28</sup> como queda dicho, nos valdremos de ella para disminuirlos y traerlos a la mitad de su área porque para formar el círculo por donde salga medio real de agua, se dividirá en dos partes iguales la hipotenusa primera».

Para calcular el caudal que pueda salir por un área determinada, utilizaban la regla de tres. Por ejemplo: Si por 77/162 dedos cuadrados de área sale 1 RA, los dedos cuadrados de área que tuviere el círculo en cuestión, permitirán salir  $\times$  RA.

Por ejemplo: ¿Cuál es el círculo por donde saldrán 100 RA sólidos?. (Fuente Castellana)<sup>29</sup>.

Si 1 RA ocupa un área de 77/162 dedos cuadrados (dd<sup>2</sup>), 100 RA ocuparan un área Ac.

El área valdrá:  $Ac = 100 \times 77/162$ ; esto es, 7700/162 dd<sup>2</sup>, equivalente a  $Ac = 47 + 43/81$  dd<sup>2</sup> (47,5308).

Conocido el área, según Arnar, su diámetro será:  $D = 7 + 11/15$  dedos (vale 7,73) y más la raíz de 440/491, valor (vale 0,94) que no sabemos de donde sale ya que matemáticamente se obtiene:

Siendo:

$$D = \sqrt{4 \times Ac \div \pi}$$

e introduciendo el valor conocido de A:

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{4 \times (7700/162) \div (22/7)} = \sqrt{4 \times 100 \times 7 \times 11/2 \times 81) \div 22/7} = \\ &= \sqrt{4 \times 100 \times 7 \times 11 \times 7 \div 2 \times 81 \times 22} = 10 \times 7/9 = 7 + 7/9 \text{ (vale: 7,77)} \end{aligned}$$

Conocido el diámetro, la longitud de la circunferencia será  $24 + 4/9$  (vale: 24,44):

Siendo:  $Lc = \pi \times D = 22/7 \times D$ , la longitud de la circunferencia que resulta del cálculo matemático anterior, será:

$$22/7 \times 70/9 = 22 \times 70 / 7 \times 9 = 24 + 4/9$$

distinto al valor dado por Arnar de Polanco:

$$24 + 21/49 \text{ (vale: 24,428), mas la raíz de } 301/567 \text{ (0,728)}$$

<sup>28</sup> Arnar acude a Euclides para extender estos cálculos a los cuadrados. Esta es su frase al respecto: «Y esta misma regla se hace para doblar cuadros, como lo dice Euclides en la proporción 47 del libro primero».

<sup>29</sup> Libro de Arnar, p. 234 (Cap. VII).

Sobre este punto, ya había dicho Ardemans lo siguiente:

«... y así, el círculo, señalado con el número primero, es el real de agua de Madrid. El círculo medio es el medio real. El dos, son dos reales de agua y el círculo cuatro, son 4 reales de agua; y así con la misma regla se va duplicando hasta que fuere menester y se puede disminuir hasta el medio cuartillo».

Esto significa que Ardemans se adelantó a Arnar de Polanco en la forma de determinar gráficamente las áreas de los distintos caños.

Arnar de Polanco se refiere en el capítulo VIII a la parte práctica de estos Viajes: a conocer el caudal suministrado por los diferentes caños, y a calcular el aljibe necesario para contener el agua recibida al día según los caños disponibles. Lo expresa así:

«Explícate las arrobas de agua que vacían en una hora, como corre, y sale del Arca de repartimiento al Depósito o fuente, siguiendo su natural corriente por el círculo de dos Reales, por el de un Real, el de medio real y por el círculo de un cuartillo y del medio cuartillo, y el grandor y capacidad que ha de tener cada uno en su depósito para encerrar el Agua que podrá correr en veinte y cuatro horas».

Arnar de Polanco estudia, a continuación, la cantidad de agua que sale por un caño y el coste de la Arroba obtenida.

Al tratarse de una exposición repetitiva para los diversos caños existentes, exponemos los datos en una tabla, utilizable para su consulta rápida. Se utilizan las siguientes unidades de volumen de líquidos:

Arr = arrobas de agua = 4 cuartillas = 8 azumbres = 16,133 litros

Cu = cuartillas = 2 azumbres = 4,03325 litros

Az = azumbre = 2,016625 litros

#### CAUDALES DE AGUA OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES CAÑOS Y COSTE DE LA ARROBA

		Caño: 2 RA(F)		Caño de 1 RA(E)		Observaciones
		Según Arnar	Corrección	Según Arnar	Corrección	
En 1 h	a	38+1/2 Arr		27+3/4 Arr <sup>30</sup>	Vale 27,75	Sale más de la mitad
En 1 d	b=24a	924 Arr		661+7/8 (7 Azum)	666 <sup>31</sup>	que en 2 RA (8,5 Arr)

<sup>30</sup> Se comprueba que el agua suministrada en 1 h en el caño de 1 RA (27 + 3/4), es bastante mayor (un 44,15%) que la mitad del obtenido en el mismo tiempo con el caño de 2 RA (a 38+1/2 Arr le correspondería 19 + 1/4 y no 27 + 3/4).

<sup>31</sup> Arnar de Polanco considera 661 + 7/8 Arr (7/8Arr = 7 Azumbres), distinto a lo calculado: 27,75 × 24 = 666 Arr.

### CAUDALES DE AGUA OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES CAÑOS Y COSTE DE LA ARROBA (*Continuación*)

		Caño: 2 RA(F)		Caño de 1 RA(E)		Observaciones
		Según Arnar	Corrección	Según Arnar	Corrección	
En 15 d	c=15b	13860 Arr		9928,125 Arr <sup>32</sup>	9990	
En 1 mes	d=2c	27720 Arr		19856+1/4 Arr	19980	
En 6 mes	e=6d	166320 Arr		119137+1/2 Arr	119880	
En 1 año	f=365b	337260 Arr <sup>33</sup>		<del>231584</del> +3/8 <sup>34</sup> 241584+3/8	243090	
Valor	g	8000 Dc <sup>35</sup>		4000 Dc		
3% <sup>36</sup>	h=3%g	240 Dc/año		120 Dc/año		
	x 375	90000 mrs		45000 mrs		
	x 4	360000 Cr		180000 Cr		
Coste de la arroba <sup>37</sup>	h×375×4/f	0,936 Cr/Arr	1,067 Cr/Arr <sup>38</sup>	1,34 Cr/Arr <sup>39</sup>	0,74 Cr/Arr <sup>40</sup>	≠1,34 Cr/Arr
		≠0,936 Cr/Arr				Arnar invierte factores

G es el valor principal de adquisición.

<sup>32</sup> Arnar desprecia 1 Azumbre:  $0,125 = 1/8$  arroba. Por cálculo se obtiene 9990 Arr. Para el cálculo de los 15 días toma en consideración la parte despreciada.

<sup>33</sup> Considera el año de 365 días y no suma de dos semestres como se suponía iba a calcular. La diferencia es de  $337260 - 332640 = 4620$  Arr, equivalente al suministro de agua durante 5 días.

<sup>34</sup> El valor anual de Arnar ( $231584 + 3/8$ ) es error de imprenta, pues el resultado de la cantidad diaria ( $661 + 7/8$ ) multiplicada por 365 da como resultado 241584 Arr. Difiere tan sólo en un número (toma un 3 en lugar del 4).

<sup>35</sup> «Si se paga censo del valor de estos 2 RA, que son 8000 ducados de principal».

<sup>36</sup> h = pago de un 3%, al ser por censo, expresado en Ducados (Dc), Maravedis (mrs), y en Cornados (Cr), siendo 1 Dc = 375 mrs; 1 mrs = 4 Cr.

<sup>37</sup> El coste de la Arroba se obtiene dividiendo el costo anual entre las arrobas obtenidas anualmente (h/f). El Valor de la Arroba está en Cornagos.

<sup>38</sup> Aquí Arnar de Polanco se equivoca al realizar el coste de la Arroba. Dividiendo 360000 por 337260 obtiene  $281/300$  que es cerca de 1 Cornago como costa de la arroba de agua sin considerar gastos de mantenimiento, reparaciones. Realizada la división correcta, esto es, dividiendo  $360000/337260$ , se obtiene  $1 + 379/5621$  (algo más de 1 Cornago), contrario a lo obtenido por Arnar:  $281/300$  (algo menos de 1 Cornago). Arnar invierte los factores y admite que  $337260 = 281 \times 1200$ , lo que no es exacto.

Arnar obtiene un coste de 0,936 Cornagos por Arroba cuando el cálculo correcto da 1,067 Cornagos por Arroba.

<sup>39</sup> Admitido el error de imprenta, Arnar vuelve a invertir los terminos al hacer la división. Divide  $241584/180000$ , obteniendo 1,34, cuando si lo realizara correctamente, saldría 0,74 Cr/Arr. La advertencia «lo que dexo advertido», no ha lugar.

<sup>40</sup> Nuevamente Arnar invierte los términos. Divide  $231584 + 3/8$  por 180000, obteniendo 1 Cr + 1/4 para el coste de la Arroba. Saca en conclusión que mediante el caño de 1 RA sale la Arroba mas cara que con el de 2 RA, dejándolo advertido. Realizados los cálculos correctos, esto es, dividiendo los 180000 Cr por los 243090, se obtiene para la arroba un valor de 0,74 Cr, más barato que con caño de 2 RA.

### CAUDALES DE AGUA OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES CAÑOS Y COSTE DE LA ARROBA

		Caño 2 RA (C)	Caño de cuartillo (B)		C: 1/2 cuartillo (A)	
		Arnar	Arnar	Corrección	Arnar	Corrección
En 1 h	a	11+3/4 Arr	7+23/43 Arr		3+9,5/4 Arr	5+15/40
En 1 d	b=24a	282 Arr	180 + 34/43 <sup>41</sup> Arr	180,8372	79 + 1 Az <sup>42</sup>	79,125
En 15 d	c=15b	4230 Arr	2711+37/43 Arr	2712,558	1186+7 Az	
En 1 mes	d=2c	8460 Arr	5423+31/43 Arr	5425,116	2373+6 Az	Vale 2373,75
En 6 mes	e=6d	50760 Arr	32542+14/43 Arr	32550,696	14242+4 Az	
En 1 año	f=365b	102930 Arr	65988,60 Arr	66005,578	28880+5Az	Vale 28880,625
Valor	g	2000 Dc	1000 Dc	1000 Dc	500 Dc	
3%	h=3% g	60 Dc/año	33 <sup>43</sup>	30	15 Dc/año	
	× 375	22500 mrs	12375	11250	5625	
	× 4	90000 Cr	49500 Cr	45000	22500 Cr	
Coste de la arroba	hx375x4/ f	0,87 Cr/Arr <sup>44</sup>	Casi 1/3 Cr/Arr <sup>45</sup>	0,68 Cr/Arr	<del>1+1/4 vuelve a cambiar factores</del>	0,779 <sup>46</sup>
			Debe ser: 0,75		1,28	

Observación: El año se considera de 365 días y no el conjunto de 12 meses.

El coste de la arroba no incluye el correspondiente de los aderezos (corte de suministro, reparaciones, etc.).

La propiedad del viaje podía corresponder al rey, al concejo, a un monasterio o a particulares adinerados. Éstos las compraban para siempre al precio de 300 Dc cada RA, en el siglo XVII (según Oliver Asín).

<sup>41</sup> Se arrastran errores debido a los números quebrados.

<sup>42</sup> Al multiplicar 3 Arr + 9,5/4 por 24, no se obtiene 79 Arr + 1 Az. Como el error puede radicar en el valor de una hora, se admite como bueno el valor de 79 Arr + 1 Az = 79,125 (1 Az es la octava parte de una arroba).

<sup>43</sup> Nuevo error de Arnar de Polanco al calcular el 3%.

<sup>44</sup> El cálculo realizado por Arnar de Polanco para el caño de 1/2 RA es correcto. En esta ocasión, coloca correctamente los factores en la división para obtener el valor de la Arroba (0,87).

<sup>45</sup> Aquí no se puede saber que error cometió Arnar de Polanco, pues haciendo la división, sale 0,75 Cr/Arr.

<sup>46</sup> Arnar vuelve a intercambiar factores y redondea a 1/4. El valor correcto siguiendo su equivocación, sería 1,2835 y no 1,25 como decide poner.

## DISEÑO DE DEPÓSITOS PARA AGUA

Arnar de Polanco, siguiendo los pasos de Teodoro Ardemans, se plantea el cálculo de las dimensiones del aljibe necesario capaz de almacenar el agua que sale durante un día completo por una fuente. Realiza un ejemplo, considerando un caudal de 924 arroba/día.

Lo primero que hacemos es pasar dicha cantidad a pies cúbicos para luego obtener las dimensiones en pies. Siendo una arroba equivalente a 0,745 pies cúbicos ( $\text{ps}^3$ ), los 924 Arr se convierten en 693  $\text{ps}^3$ :

- Si la forma del depósito queremos que sea rectangular, por ejemplo, la forma de un cubo, el valor del lado se obtiene extrayendo la raíz cúbica de 693, dando por resultado 8,85 pies aproximados de lado. Construyendo un cubo que tenga de lado 8,85 pies, se obtiene un volumen de 693,154  $\text{ps}^3$ , válido para las necesidades propuestas.
- Si la forma del depósito queremos que sea cilíndrica, debemos fijar primero el diámetro (D) o la altura deseada. En el caso de que el diámetro (D) sea igual a la altura (H), los cálculos serán los siguientes: La fórmula a aplicar:

$$V = \pi \times D^2 \times H = \pi \times D^3$$

de donde, despejando el valor del diámetro:

$$D = \sqrt[3]{V \div \pi} = \sqrt[3]{693/\pi} = \sqrt[3]{220,5} = 6,04 \text{ pies,}$$

considerando que la constante  $\pi$  vale 7/22.

Los valores 8,85 pies y 6,04 pies se han de pasar a fracciones. Los valores dados por Arnar de Polanco no son exactos, de ahí que su sistema no se deba seguir por lo engorroso que resulta y la pérdida de tiempo que conlleva. El texto de Arnar de Polanco puede llevar a confusiones, pues a la altura del cilindro también lo llama diámetro.

Arnar de Polanco parece que realiza estos cálculos para los casos más usuales para que sean seguidos y no analizados pues el nivel cultural de los fontaneros no es el de ahora. De esta manera, el fontanero quedaba bien ante los clientes que es lo que en el fondo buscaban, dejando una especie de oscurantismo que no les venía nada mal. A tal fin, Arnar nos repite:

«Y por no hacer mucho al caso, que los dichos Depósitos vengan cabales en sus cabidas, así los cuadrados como los cilíndricos, no se han ajustado por números más exactamente, si solo he atendido a dar esta noticia de magnitudes y a que quepan en la capacidad o hueco de dichos Depósitos, mas Arrobas de Agua de lo que se ha probado por experiencia corre en cada uno en el tiempo de las 24 horas, como queda referido».

Caño de volumen	Arrobas	Forma cuadrada	Forma cilíndrica	Resultados dados por Arnar de Polanco, tras considerar las arrobas recogidas en 24 horas, en diferentes caños.
		Longitud del lado	Diámetro = Altura	
2 RA	924	$8 + \frac{5}{8}$ ps	$9 + \frac{3}{8}$ ps	
1 RA	$661 + \frac{7}{8}$	$7 + \frac{3}{4}$ ps	$8 + \frac{1}{4}$ ps	
$\frac{1}{2}$ RA	282	$5 + \frac{13}{16}$ ps	$6 + \frac{5}{16}$ ps	
Cuartillo	$180 + \frac{34}{43}$	5 ps	$5 + \frac{1}{2}$ ps	
$\frac{1}{2}$ Cuartillo	$79 + 1$ Az	$3 + \frac{13}{16}$ ps	4 ps + 5 ds	

Sobre el modo de hacer los depósitos, dirige al interesado a dos libros para su consulta: El primero es el de Fray Lorenzo de San Nicolás (Primera parte de «Arquitectura», capítulo 71, folio 132), y el segundo, de Teodoro Ardemans («Fluencias de la Tierra», capítulo 20, folio 160).

También menciona la solución de utilizar tinajas, recomendando en estos casos introducir algunos canutillos de Azufre para «que el agua se aclare y conserve sin corrupción».

#### BIBLIOGRAFÍA

- CÉSPEDES, A. DE (1606): *Libro de instrumentos nuevos de geometría, muy necesarios para medir distancias y alturas sin que intervengan números como se demuestra en la práctica*.
- ARDEMANS, THEODORO (1724): *Fluencia de la Tierra y curso subterráneo de las aguas: Medidas de las aguas*.
- ARNAR DE POLANCO, JUAN CLAUDIO (1723): *Antiguos viajes de agua. Agua que tiene Madrid para su abasto*.
- (1727): «Arithmética inferior y geometría práctica y especulativa: Origen de los nacimientos de las aguas dulces y gordas de esta coronada villa de Madrid, sus viajes subterráneos con la noticia de las fuentes públicas y secretas de las casas de señores y particulares, y la cantidad que tiene cada uno», que integra el *Tratado de los quatro elementos, origen y nacimiento de las aguas y fuentes de Madrid, y sus viages subterráneos*. Existe edición facsímil del Tratado de los quatro elementos. De la editada en 1727. E y P Libros Antiguos. Madrid, 1992.
- (1734 y 1729): *Discurso curioso, Regla general y fácil para los aforadores*. Ed. Manuel Moya.
- OLIVER ASÍN, JAIME (1952): *Historia del nombre de Madrid: Agencia española de cooperación internacional*. Reedición de 1991. Instituto Oliver Asín, CSIC, 412 pp., Madrid.

**RESUMEN:** Al no conservarse los proyectos originales de la construcción de los viajes de agua de Madrid, se dan como máximas fuentes de información las obras de Andrés de García de Céspedes (1606), Teodoro Ardemans (1725) y Aznar de Polanco (1727). Se analizan técnicamente las construcciones relacionándolas con los conocimientos de la época en materia ingenieril.

**PALABRAS CLAVE:** Viajes de agua madrileños. Andrés de García de Céspedes (1606), Teodoro Ardemans (1725) y Aznar de Polanco (1727).

**ABSTRACT:** As no original projects for the building of Madrid's water ways have been recovered, the works of the authors Andrés de García de Céspedes (1606), Teodoro Ardemans (1725) and Aznar de Polanco (1727) are considered the main sources of information. These building are analyzed from a technical point of view in connection with the engineering knowledge in the same period of time.

**KEY WORDS:** Madrid water ways Andrés de García de Céspedes (1606), Teodoro Ardemans (1725) and Aznar de Polanco (1727).

Recibido: 8 de enero de 2007.

Aceptado: 15 de febrero de 2007.

