

EL ARTE DE AFORAR: DEL NILÓMETRO A LA PAJA DE AGUA CORDOBESA

JOSÉ ROLDÁN CAÑAS
Académico Numerario

RESUMEN

Esta ponencia pretende describir la evolución diacrónica del aforo desde los orígenes hasta la paja de agua cordobesa, o medida de agua que se usó en la ciudad de Córdoba entre los siglos XVI y XIX. También se presenta la determinación de su valor expresándolo en unidades del sistema métrico decimal.

El aforo de corrientes de agua ha tenido un gran interés para la humanidad desde sus albores. Las grandes civilizaciones han nacido y crecido a la orilla de los grandes ríos, y una de sus grandes preocupaciones era controlar sus avenidas e inundaciones de las tierras ribereñas. Midiendo la cantidad de agua se podía hacer un control más efectivo y se conseguía una mayor productividad de las tierras regadas. En el mundo romano y árabe se perseguía una distribución equitativa del agua, lo que también exigía medir el agua. En ambos casos, la sección de paso del conducto, exclusivamente, servía para calcular el caudal circulante.

Hay que esperar hasta el Renacimiento, para que se cuantifique el valor de la velocidad de desagüe por orificios a partir de la ecuación de Torricelli. A principios del siglo XVIII se llega a la ecuación de gasto en su forma actual.

En paralelo, y hasta el siglo XIX, coexistieron unas medidas de agua que estimaban el caudal basándose en la sección de paso, igual que en época romana, y aunque se era consciente de la importancia de la carga de vertido, nunca se llegó a considerar de forma explícita. La paja de agua fue la más usada aunque con valores muy diferentes en ciudades y territorios distintos.

La cuantificación de la paja de agua cordobesa, a partir de un aforador de 1869, culmina este trabajo. El valor obtenido, algo más elevado que el consignado en otros lugares, es corroborado por diferentes citas documentales.

PALABRAS CLAVE: Aforo, medidas antiguas de agua, paja de agua, aforador, Córdoba

SUMMARY

This talk aims to describe the diachronic evolution of the water measurement from its origins to “*la paja de agua cordobesa*”, a local unit of water measurement, which was used in the city of Córdoba between sixteenth and nineteenth centuries. Also, the determination of its value expressing it in the metric system is presented.

The water measurement of the stream has been of great interest of mankind since the beginning. The great civilizations were born and raised on the banks of the great rivers, and one of its major concerns was to control its avenues and flooding of riparian lands. By measuring the amount of water, a more effective control could be made and a higher productivity of irrigated land was achieved. An equitable distribution of water was sought in the Roman and Arab world, which also required measuring the water. In both cases, the cross section of the conduit, exclusively, served to calculate the circulating flow discharge.

It was not until the Renaissance, that the discharge velocity value through orifices was quantified from Torricelli's equation. In the early eighteenth century the water discharge equation in its present form is obtained.

In parallel, and until the nineteenth century, coexisted measures that estimated water flow based on the cross section of the conduit, as in Roman times, and, although they were aware of the importance of water head, never came to be considered explicitly. The "*paja de agua*" was the most used but with very different values in diverse cities and territories.

The quantification of the "*paja de agua cordobesa*", from a flume of 1869, culminates this work. The value obtained, somewhat higher than that recorded in other places, is corroborated by different documents.

KEY WORDS: Water measurement, old measures of water, *paja de agua*, flume, Córdoba

Introducción

Según el Diccionario de la Lengua Española (DLE), el término *aforar* en su cuarta acepción significa "Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo". Asimismo, para la palabra *paja* en su décima acepción nos dice "Caudal de agua que suministra el tubo principal de una casa a la cañería particular" aunque esta definición es solo aplicable en los países de El Salvador y Nicaragua. De general uso es, sin embargo, su definición del término *paja de agua* "Medida antigua de aforo, que equivalía a la decimosexta parte del real de agua, o poco más de dos centímetros cúbicos por segundo". A su vez, define un *real de agua* como "Medida antigua de aforo, correspondiente al líquido que corría por un caño cuya boca era del diámetro de un real de plata. En Madrid se fijó el gasto en 3 pulgadas cúbicas por segundo, o en 100 cubas al día, que se considera en el canal del Lozoya equivalente a 32 hl". Por tanto, y considerando que una pulgada castellana es igual a 2,321 cm, se deduce que una *paja de agua*, según el DEL, equivale a 200 l/día (8,33 l/h o 0,14 l/min o 0,0023 l/s).

Más localmente, en países como Colombia, Costa Rica y Guatemala, la *paja de agua* es también "Llave para regular el paso de los líquidos" y en Costa Rica significa además "Riachuelo".

El título de esta conferencia pudiera parecer algo pretencioso por cuanto, según Solís (1990), los aspectos cuantitativos en la hidrología han permanecido ausentes hasta el siglo XVII exceptuando alguna observación de Aristóteles sobre la magnitud de los caudales de la tierra y otra de Séneca sobre la escasa profundidad a la que se filtra el agua de lluvia. Ello se ha debido, por un lado, a la falta de conceptos métricos y de

procedimientos de medición y, por otro lado, a la dificultad de obtener los datos climáticos e hidrológicos de forma normalizada y, por tanto, comparable.

Sin embargo, nuestros primeros antepasados entendieron el concepto de cantidad de agua que circulaba por los ríos y canales y su relación con la altura o con la anchura que la corriente alcanzaba en los mismos, aunque no la pudieron cuantificar adecuadamente. De este modo, nos encontramos con los *Nilómetros*, que los egipcios situaron a lo largo del río Nilo para conocer la importancia de la inundación anual y, de ahí, la cosecha esperable, o con los partidores en las acequias capaces de separar el caudal en partes proporcionales a la anchura en que se divide la conducción. También eran conscientes que, a mayor calado o altura del agua en una acequia o en un depósito, el caudal circulante o desaguado, respectivamente, era más grande, pero, en este caso, se encontraron con una dificultad añadida: la relación entre ambas variables no es directamente proporcional como sucede con la correspondencia entre caudal y anchura.

Hay que esperar al Renacimiento para que, a partir de la observación de la naturaleza y de la experimentación, se proporcionaran las primeras ecuaciones para calcular el caudal en forma parecida a como actualmente se hace. Pero, y aunque la difusión de estos avances fue relativamente rápida entre los ingenieros hidráulicos de la época, su aplicación práctica y su propagación geográfica necesitó a veces de varios siglos lo que habilitó el desarrollo de múltiples tipos de medidas de las corrientes líquidas cuyo único parecido era su nombre. Por ejemplo, la paja de agua, cuya equivalencia con las unidades de medida actuales varía según la ubicación geográfica que consideremos, incluso entre ciudades muy próximas, a pesar de la muy concreta definición de la Real Academia Española de la Lengua.

Lo anterior, además de ser una clara consecuencia de errores conceptuales en su definición, impide que medidas con el mismo nombre sean equiparables y que el procedimiento de toma de datos pueda ser generalizable y homologable.

La antigüedad clásica

La primera magnitud que nuestros antepasados relacionan con el aforo es el calado del agua en las corrientes fluviales. Aunque la correspondencia entre ambas variables no se estableció hasta muchos siglos después cuando las relaciones físicas entre las diferentes magnitudes se plasmaron en ecuaciones matemáticas, los egipcios no estaban muy descaminados al considerar que el nivel de las inundaciones del Nilo era de gran importancia ya que el volumen de agua que regaba el terreno y, por tanto, la producción agraria, dependía del mismo. Para medirlo se usaban unas escalas graduadas talladas en la roca que Estrabón, geógrafo griego que vivió entre el siglo I a.C. y el I d.C., denominó *Nilómetros* (Viollet, 2007, p.56).

Aunque se han encontrado muchos *Nilómetros*, existían dos importantes localizaciones para la medida del nivel de las inundaciones, una situada en la Isla Elefantina, Aswan, punto de entrada a Egipto, y otra en Memfis, que marca las avenidas en el delta del Nilo (Viollet, 2007, p.56). Para evitar las fluctuaciones del Nilo que podían afectar la medida del aforador, la lectura se hacía en un pozo conectado al río mediante un túnel.

Según nos cuenta Estrabón en su obra “*Geografía*”, las marcas indicaban las mayores avenidas, las menores y la media. Los inspectores inspeccionaban los pozos y comunicaban sus observaciones a la población que así podía saber, en avance, cuando ocurriría la próxima inundación y su magnitud. Esta información no solo era útil para que los agricultores regularan la distribución de agua en sus campos y canales, sino también para que las autoridades pudieran estimar los ingresos públicos de ella derivados que aumentaban con la intensidad de la inundación.

Las medidas comenzaban a finales de junio, en el solsticio de verano, y continuaban a lo largo del periodo de inundación hasta finales de octubre.

También en China, el ingeniero Li colocó 200 años a.C. unas escalas limnimétricas para conocer el nivel de los ríos y canales (Rouse e Ince, 1963).

Los Nilómetros árabes más antiguos se instalaron en el 715 d.C. en la isla de Roda cerca de El Cairo (Garbrecht, 1987, p.5). Existen registros ininterrumpidos de los niveles máximo y mínimo de las aguas del Nilo en ese punto hasta 1890, es decir, durante un periodo de 1175 años.

Más sofisticada resultó la invención de algunas máquinas, como los relojes de agua, cuyo correcto funcionamiento exigía una adecuada interrelación entre las dos variables básicas de las que depende el caudal: la altura de agua en el recipiente, que se transforma en velocidad como se verá posteriormente, y la sección de paso. Ctesibio de Alejandría y Filón de Bizancio, ambos griegos que vivieron en el siglo III a.C., inventaron muchos aparatos entre las que se incluyen las clepsidras, o relojes de agua (Viollet, 2007, p. 105). Según McNown (1976), estos dispositivos tienen un origen egipcio aunque la palabra proviene del griego y significa robar agua. En efecto, obsérvese que su primera sílaba coincide con la de la palabra cleptomanía. Este artificio consistía en una cubeta con una escala horaria que desaguaba por un orificio situado cerca de su base. Para asegurar la salida del mismo volumen de agua, y poder disponer, por tanto, de una escala lineal de medida, el recipiente debe ser más ancho en su parte superior. De este modo, la disminución en el área de la superficie del agua al descender su altura tiende a compensar la reducción del caudal de salida debida a esa menor carga de agua (Roldán-Cañas y Moreno-Pérez 2010).

En Grecia, la cantidad de agua que se derivaba hacia un canal se cuantificaba únicamente midiendo el área de paso del flujo. Herón de Alejandría, siglo I d.C., fue el primero que escribió en su obra “*Dioptra*” que para conocer el agua que suministra un manantial o fuente no es suficiente con saber la sección transversal del flujo, sino que es necesario también averiguar la velocidad de la corriente, de modo que cuanto más rápida era la corriente, mayor cantidad de agua suministraba la fuente (Viollet, 2007, p.125).

Frontino, un político romano del siglo I d.C., fue nombrado encargado de los acueductos romanos, *curator aquorum*, y escribió un libro titulado “*De aquaeductu*” en el que también comentaba la importancia de la velocidad para calcular el volumen de agua que fluye (Viollet, 2007, p.185). Sin embargo, y como se verá más adelante, en la estimación del caudal de los diferentes acueductos romanos se usó como medida la *quinaria* que es una unidad de área.

No está claro si Herón copió a Frontino o sucedió al revés, aunque lo más probable es que ambos realizaran sus observaciones independientemente.

Aunque Frontino, y los romanos en general, no sabían introducir en sus fórmulas las nociones de velocidad, carga o rozamiento para determinar el flujo circulante, eran conscientes de su influencia y al medir trataban de atenuar sus efectos. Así, las mediciones no se hacían sobre el *specus* de un canal sino a la entrada de los depósitos de decantación que había a lo largo de su recorrido (Malissard, 1996, p.188). En ellos se practicaban aberturas calibradas a la misma profundidad con lo que se pretendía, aunque no siempre se lograba, que las medidas fueran comparables.

Vitrubio, arquitecto e ingeniero romano del siglo I a.C., decía que el calibre de los tubos se debía establecer en función del caudal de agua. Inicialmente, los calibres se dispusieron sin criterio hasta que se normalizó el valor de la *quinaria* en época de Agripa, poco antes del nacimiento de Cristo. El nombre de *quinaria*, o tubo de 5, le viene de su diámetro que era el de cinco *quadrantes*, es decir, cinco cuartos de pulgada, y esa unidad servía de base a una progresión regular que iba de *quadrante* (equivalente a 0,4625 cm) en *quadrante* (Malissard, 1996, p.206). La *quinaria* se hacía en bronce para evitar los fraudes por deformación de la boquilla. También se usaba un tubo calibrado, o *calix*, de una longitud de 12 *dedos*, alrededor de 25 cm, colocado, generalmente, al comienzo del tubo de alimentación (Bonnin, 1984, p.332).

Además, y para garantizar que las casas adineradas no pudieran incrementar su caudal, la ley romana prohibía que estos ensancharan sus tuberías a un diámetro mayor de aquel que se había concedido para el orificio de toma (Levi, 2001, p.102). Pero esta limitación era solo para los primeros 50 pies desde la toma y, hoy se sabe, que es posible aumentar el caudal aunque el ensanche se haga más allá de esos 50 pies.

Vitrubio describe también la distribución de agua entre los diferentes usuarios de una urbe y como se podía dar prioridad a unos frente a otros en caso de escasez. El agua que llegaba a la ciudad a través de acueductos se dirigía hacia unos depósitos denominados *Castellum* construidos en las murallas y compuestos de varias cisternas, de igual tamaño cada una, conectadas a él (Viollet, 2007, p.132). El número de cisternas variaba en función de los diferentes usuarios que se pensaba abastecer. En el depósito se disponían de rebosaderos a diferentes alturas de modo que el de menor altura sólo derivaba el agua, a través de una tubería de un determinado diámetro, hacia la cisterna que suministraba las fuentes públicas, que es, por tanto, el uso prioritario. Desde el aliviadero situado a altura intermedia, el agua se distribuía a la segunda cisterna que abastecía a los baños públicos a través de una tubería de menor diámetro. Por último, desde el rebosadero situado a mayor altura se llegaba a la tercera cisterna usada para el suministro de casas privadas mediante una tubería de diámetro menor a los anteriores (ver figura 1). Así pues, los particulares solo recibían agua si previamente se había satisfecho la demanda de agua de la población, en primer lugar, y de los baños públicos, en segundo lugar (Fallbusch, 1987, p.27). El carácter social de la distribución de agua de los romanos ha tardado casi 20 siglos en volver a restablecerse en nuestras ciudades.

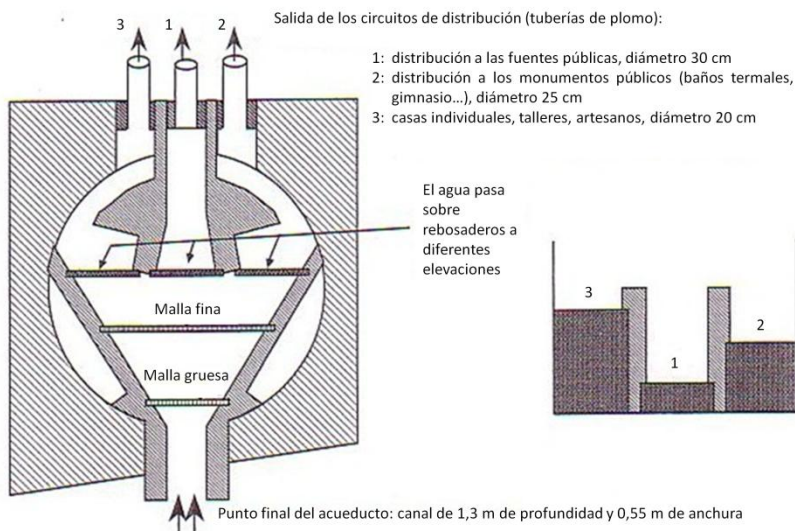


Figura 1. Castellum de distribución de agua en una ciudad romana
(Fuente: Viollet, 2007)

Los sistemas usados para medir el caudal tanto por Frontino como por Vitrubio no diferían sustancialmente. Ambos tenían como objetivo calcular la sección transversal de paso del agua en un conducto. La única diferencia era numérica ya que Frontino usaba como valor de Π la fracción (22/7) en tanto que Vitrubio utilizaba la menos precisa, pero más fácil de usar en los cálculos, de (25/8) (Fallbusch, 1987, p.30). Lo realmente asombroso del mundo romano fue que no detectaran las dimensiones del caudal (volumen por unidad de tiempo) ya que, por un lado, conocían las medidas de líquidos (el ánfora era una medida de volumen estandarizado), y, por otro lado, la determinación del tiempo fue común durante siglos. Individualmente, sabían lo que era la sección transversal y lo que era la velocidad pero no su producto. Se medía la sección pero no el tiempo transcurrido, por lo que dicho producto no se podía calcular.

El mundo árabe

En la península Ibérica, la agricultura vivió una época de esplendor, a partir de la dominación árabe en el siglo VIII, debido al desarrollo del riego a gran escala. La gran preocupación en el mundo árabe no era conocer la cantidad de agua circulante por una acequia, sino que el reparto de agua entre los regantes siguiera reglas de proporcionalidad: cada regante recibía el agua en proporción a la cantidad de tierra que poseía (Glick, 1988). No obstante, el total de agua repartido no era una cantidad fija por unidad de superficie sino que variaba en relación al caudal del río. Si la cantidad disponible de agua era muy escasa, el regante no podía regar a voluntad sino siguiendo un turno (*tanda* o *dula*) preestablecido. La unidad de medida abstracta se denominaba *fila* (hila o hilo de agua) que representaba una parte de la cantidad total de agua en un río, fuente o acequia (Glick, 1988).

La *fila* es un número que indica la proporción del caudal total que puede tomar una acequia; si nos encontramos en época de abundancia de agua dicha cifra va de acuerdo a

la capacidad de la acequia; si en época de escasez de acuerdo a un número de horas equivalente y proporcionado. Según Glick (1988), los valores tradicionales de filas de agua están expresados en múltiplos de doce y, normalmente, una fila es el equivalente a una hora de agua. La unidad de medida del agua basada en horas es muy habitual en el Oriente: Irak, Yemen, Siria, etc., donde la medida tipo es el *qīrāt* que, aunque varía de unos lugares a otros y entre acequias, tiene la connotación básica de 1/24 parte y suele equivaler a una hora de riego.

También existían dispositivos para medir el agua entre los que se encuentra el agujero, o módulo partidador, practicado en una piedra que, según sus dimensiones, dejaba pasar un número fijado de hilas de agua quedando el resto para los regantes situados aguas arriba del mismo. La repartición proporcional del agua desde una acequia a otras dos se hace con un partidador que divide el flujo entrante en dos corrientes salientes exactamente iguales. Por esta razón, los partidadores debían ser exactamente diseñados, nivelados y construidos (Roldán-Cañas y Moreno-Pérez, 2010).

En el próximo Oriente es posible encontrar un sistema ancestral de riego que aún continúa vivo. Se trata de los *Aflaj* (*Falaj*, en singular), que constituyen, técnicamente hablando, el conjunto de obras de captación, conducción y distribución de agua, tanto para abastecimiento de poblaciones como para riego, con origen ancestral que se practica en Omán. Pero un *falaj* es algo más, es un sistema que ha permitido el uso sostenible del recurso hídrico y ha generado a su alrededor el desarrollo de una población y de unos cultivos que, de otro modo, no habrían existido en un clima desértico como el que nos ocupa. El término *Falaj* se deriva de una antigua raíz semítica que significa “*Dividir*”, de ahí que se hagan particiones de agua que se fraccionan entre los propietarios (Wilkinson, 2013).

La organización de los *Falaj* sigue la ley Islámica que prevé un reparto equitativo, ya comentado, de tierra y agua entre los regantes. Asimismo, se acepta que cada parcela debe ser humedecida hasta la altura del tobillo de un hombre, siguiendo al Profeta. Alcanzada esa altura, el agua se conduce hacia la parcela situada aguas abajo de la anterior.

Para conseguir un reparto igualitario de agua, la disposición natural de la tierra cultivada alrededor de una fuente de agua (pozo, manantial, etc.) sería la circular, y la tierra se dividiría entre los regantes en segmentos cada uno regado mediante un canal radial (ver figura 2.A). Sin embargo, al tratarse de canales donde el agua fluye por gravedad, la derivación de agua debe hacerse sucesivamente hacia los regantes situados a ambos lados del canal, lo que se traduce en una forma rectangular de la tierra cultivada antes que circular (ver figura 2.B). Este segundo sistema presenta la desventaja de que la cantidad de agua que reciben las parcelas situadas más aguas abajo es cada vez menor debido a las pérdidas por filtración y evaporación.

Una solución sería hacer un número de particiones superior a dos al subdividir el flujo (ver figura 2.C). Sin embargo, ese número es limitado pues a mayor arco de distribución menor es la pendiente natural de la tierra que puede efectivamente usarse y más lento es el movimiento del agua en los canales exteriores.

Si se dispusiera de medidores de caudal o se pudiera hacer un reparto de agua basada en una programación variable del tiempo de riego, una solución más compleja

podría hacerse (ver figura 2.D). No obstante, el número de repartos en cualquier punto está limitado pues a mayor número de divisiones, mayor será el cociente entre canal y área cultivada y menor, por tanto, el uso efectivo del agua.

El modelo más normal de reparto sería el mostrado en la figura 2.E, donde se hace una primera bifurcación antes de llegar a las parcelas. Si el volumen de agua lo permite, los canales se pueden bifurcar de nuevo en cuyo caso el número de parcelas iguales puede subir de cuatro a ocho, dos a ambos lados de cada canal (Wilkinson, 2013).

Una vez conseguida una distribución equitativa de agua, y al no disponer de dispositivos de aforo, el reparto de agua se hace por tiempos. En primer lugar, se establece la frecuencia de riego o *dawran* (entre 7 y 14 días), posteriormente, el agua se distribuye entre los propietarios usando una unidad de reparto, basada en tiempos, denominada *athar*, de modo que cada día tiene 48 *athars*. A su vez, un *athar* se subdivide en 24 *qiyas* que es, prácticamente, la unidad de reparto más pequeña y que equivale al tiempo requerido para regar una palmera datilera con un buen caudal. La duración del tiempo de reparto es inversamente proporcional al caudal y al número de propietarios del *falaj* y directamente proporcional a la contribución del propietario en su construcción. Cada agricultor regará su finca con el mismo número de *athars* en cada *dawran*.

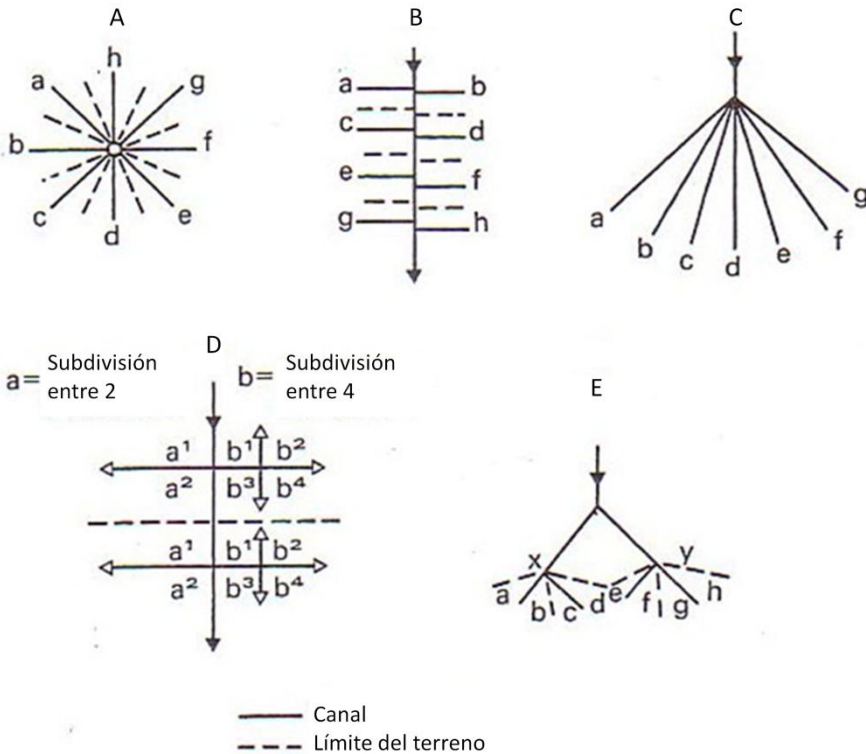


Figura 2. Formas de reparto de agua entre acequias y regantes en el mundo árabe (Fuente: Wilkinson, 2013)

En el norte de África, en Argelia fundamentalmente, existen unos sistemas para captación de agua subterránea denominados *foggara* cuya estructura y concepción es similar a los *qanats* (Moussaoui, 2011, p.248). En la desembocadura al exterior de las mismas, se dispone una pileta de forma triangular denominada *qasri* y que posee en su base una pieza con aspecto de peine con dientes hacia abajo, habitualmente tallada en piedra, y que sirve para separar las partes de agua entre los diferentes usuarios de forma que se garantiza un reparto proporcional y equitativo entre los mismos (ver figura 3).

La medición del agua que circula por una acequia se hace usando una *hallafa* o *shaqfa* que consiste en una placa de cobre rectangular con una serie de agujeros de diferentes diámetros que representan unidades de medida, normalmente múltiplos o divisores del *qīrāt* (ver figura 4).

La operación de medida requiere cavar una pileta de 50 x 50 cm paralela a la acequia hacia donde se desvía el agua de esta. En ella se coloca una *shaqfa* de una longitud igual a la de la pileta y se taponan con arcilla los agujeros. Posteriormente, se destapan algunos agujeros hasta conseguir que el nivel del agua, aguas arriba y aguas abajo de la placa, sea el mismo. En ese momento, se anula el efecto barrera de la *shaqfa* y el agua circula libremente como si no existiera la misma. El caudal se obtendrá contando los agujeros descubiertos y sumando sus valores respectivos (Moussaoui, 2011, p.250). Este sistema de cálculo, de apariencia esotérica, tiene sus especialistas (el *kiyyal al-ma*) y se transmite de forma secreta. En la parte inferior de la pileta se practica una abertura a través de la cual el agua derivada vuelve a la acequia.



Figura 3. *Qasri* situado a la salida de una *foggara* (Fuente: Moussaoui, 2011).



Figura 4. Hallafa y kiyyal al-ma (Buda, Adrar) (Fuente: Moussaoui, 2011).

El procedimiento no tiene en cuenta la pérdida de carga que sufre el agua al pasar a través de los orificios que exigiría, para una correcta medida, que el nivel del agua aguas abajo fuera ligeramente inferior al de aguas arriba. Sin embargo, el error es relativamente pequeño y el modo de cálculo es, hidráulicamente, bastante aproximado.

El Renacimiento

Durante el Renacimiento, se produce un gran cambio desde la ciencia puramente filosófica de los Escolásticos, imperante durante los oscuros años de la Edad Media, hacia la ciencia de la observación. El lugar donde esta tendencia aparece en primer lugar es Italia, y dos de sus mayores representantes fueron Leonardo da Vinci (1452-1519) y Galileo Galilei (1564-1642). En lo que respecta a la ciencia hidráulica, hay dos grandes diferencias entre ellos. Por un lado, la aportación de Leonardo es abundante y muy sagaz pero, por diversas circunstancias, fue poco diseminada. Por otro lado, Galileo tiene menos descubrimientos hidráulicos pero sus hallazgos los compartió con sus discípulos y con el mundo científico. Seguramente como resultado del empuje de ambos, se formó la denominada por Rouse e Ince (1963), y así llamada en el título de un artículo posterior de Maccagni (1987), la *Escuela Italiana de Hidráulica*, que es la única que existe hasta mediados del siglo XVII, aunque el que se considera su fundador es el padre benedictino Benedetto Castelli (1577-1644), discípulo de Galileo, debido a la publicación de su libro “*Della misura delle acque correnti*” en 1628.

A finales del siglo XVI, las medidas del caudal en ríos y arroyos se basaban, exclusivamente, en la medida del área de la sección de paso, estimándose que ambas magnitudes eran proporcionales. Precisamente, Castelli es el primero que escribe en ese libro que, además de la sección, hay que considerar la velocidad de modo que donde el río tiene menos velocidad, allí será de mayor profundidad, y en esas partes con mayor velocidad será de menor calado (Levi, 2001, p.126). En este punto, Castelli reconocía la

validez de un antiguo refrán que dice “cuidaos de las aguas mansas” ya que serán de mayor profundidad y, por tanto, más peligrosas para quien las quiera cruzar.

Según Rouse e Ince (1963) se podría entender que el principio de Castelli habría sido ya expresado de alguna forma por Leonardo da Vinci, pero Di Fido y Gandolgi (2011) aclaran que se pueden considerar descubrimientos independientes por cuanto los códices de Leonardo eran desconocidos en la época de Castelli.

Evangelista Torricelli (1608-1647) confió a su maestro el abad Benedetto Castelli (1578-1643), a quien superó tanto en logros como en el valor potencial de los mismos, dos libros para que los sometiera a juicio de Galileo Galilei (1564-1642). Eran su carta de presentación ante el insigne Galileo en la idea de Castelli de que Torricelli pudiera ser la persona adecuada a quien el anciano comunicara, y con la que discutiera, sus pensamientos y, que a la vez, le ayudara a terminar su libro sobre *Las Nuevas Ciencias*. Desafortunadamente, Galileo murió a los 77 años, justo tres meses después de estar juntos (Levi, 2001, p.51).

El segundo de los libros de Torricelli, *Motu proiectorum* (Del movimiento de los proyectiles) incluía una última parte de contenido hidráulico, *Motu aquarum* (Del movimiento de las aguas), en el que se demuestra, y comprueba experimentalmente, su famoso teorema que él enunció del siguiente modo: *las velocidades del agua que sale de un tanque perforado son proporcionales a la raíz cuadrada de las profundidades por debajo de la superficie libre de los orificios correspondientes* (Levi, 2001, p.67). Este teorema transforma una carga de altura de agua en velocidad y cuantifica lo ya observado por los matemáticos griegos y romanos.

Según Levi (1987), Torricelli dedujo sus resultados de los teoremas fundamentales de Galileo Galilei, cuya Cátedra de Florencia heredó y ocupó durante los cinco años previos a su prematura muerte, sobre la caída libre de los graves. La similitud de su teorema con los enunciados de Galileo, hacen suponer que estos le sugirieron su tratamiento del chorro como una sucesión de partículas en caída libre con una velocidad gobernada por la elevación inicial de la superficie libre en el depósito (Rouse e Ince, 1963, p.62). Según estos mismos autores (p.61), durante esa época Torricelli fue conocido no solo como un sagaz analista sino también como un experto manipulador de los equipos experimentales.

Torricelli comentó que esta ley ya era conocida por su maestro Benedetto Castelli con anterioridad. Sin embargo, autores como Daniel Bernoulli o Giovanni Poleni afirmaron que lo que Castelli había supuesto en 1641, tres años antes de los escritos de Torricelli, es que la velocidad de salida era proporcional a la altura y no a la raíz cuadrada de dicha altura como bien decía Torricelli (Simón Calero, 1996, p.14; Maccagni, 1987, p.85).

La ley enunciada por Torricelli fue muy importante por diversas razones (Simón Calero, 1996, p.386). En primer lugar, es la primera que se refiere a fluidos en movimiento. En segundo lugar, identifica a los fluidos con los cuerpos sólidos, esto es, asimila el agua desaguando por un orificio a un cuerpo en caída libre. En tercer lugar, propone, por primera vez, una relación matemática. En cuarto lugar, abre un campo de experimentación dedicado a la descarga que se desarrollará durante los siguientes

cincuenta años. Y, por último, establece un método que no solo sirve para calcular la velocidad sino también el caudal, lo que constituye el objeto de este trabajo.

Aunque la proporcionalidad que marca la ecuación de Torricelli entre velocidad y raíz cuadrada de la altura es correcta, su evolución hacia la forma exacta de la ecuación de desagüe tal y como hoy se le conoce, ha contado con la contribución de múltiples autores a lo largo de los años y siglos siguientes.

Ya, Castelli, en su libro publicado en 1628, consideraba que los orificios, a medida que aumentan su tamaño, descargan más caudal en comparación con los más pequeños, o lo que es lo mismo, la relación entre el caudal que desagua por un orificio más grande y el que lo hace por uno menor es mayor que la razón entre sus áreas respectivas (Levi, 2001, p.124). Castelli lo achaca, con razón, al rozamiento del agua con los bordes del orificio que será proporcionalmente menor al aumentar su tamaño. Sin embargo, este aspecto no es considerado en el teorema de Torricelli, pues, según este, el caudal desaguado desde un depósito a través de varios orificios, situados en un mismo plano equidistante de la superficie libre del agua es proporcional a su tamaño.

De forma diacrónica, la secuencia de aportaciones a la ecuación de Torricelli comienza, casi simultáneamente, en la *Academia de París* donde se desarrollaron, más o menos en paralelo con la escuela italiana, otros trabajos sobre el desagüe de fluidos. A destacar los experimentos llevados a cabo por Christiaan Huygens (1629-1695) en 1668 que, en principio, confirmaban la ley de Torricelli pero de los que se desdijo al año siguiente (Simón Calero, 1996, p.14, 386). Huygens encontró, en segundas instancias, que en el experimento se recogía menos agua de la prevista lo que, según los conocimientos de la época, conducía a dos posibles interpretaciones, o bien la velocidad no era proporcional a la raíz cuadrada de la altura o bien la altura a considerar no era la del agua en el depósito sino una fracción de la misma. Hoy día sabemos que el proceso de desagüe no es puramente cinemático, como supuso Torricelli, sino dinámico, y sobre el mismo intervienen otros factores tales como la forma del recipiente y del orificio de salida, la relación entre el área de ambos y la viscosidad del agua, que poco a poco fueron introducidos en la fórmula durante los años posteriores.

En el mismo sentido se dirigieron los experimentos de Domenico Guglielmini (1655-1710) realizados en 1683 y publicados en Bolonia en 1690 en el libro *Aquarum fluentium mensura nova método inquisita* (Nuevo método de medida de las corrientes de las aguas). Guglielmini encontró que la ley de Torricelli sería correcta si la altura a considerar fuera solo la cuarta parte de la profundidad del agua en el depósito (Simón Calero, 1996, p.19, 389).

Isaac Newton (1643-1727) mostró, en el segundo libro de su obra *Principia*, editado en Londres en 1686, que el gasto evacuado por un orificio bajo cierta altura de agua es igual al que pasaría por un orificio de diámetro $(21/25)$ del anterior, por lo que pensó, inicialmente, que la hipótesis de Torricelli era falsa. Sin embargo, cambió de idea al observar que el chorro de salida del agua por un orificio se contraía una vez el agua salía al exterior, y razonó que, por tanto, el caudal evacuado no era el correspondiente a la sección del orificio sino el que pasaría por la sección reducida (Levi, 2001). El coeficiente de contracción, C_c , o C_d en su forma final, fue estimado por Newton en un valor de 0,706 correspondiente a $(21^2/25^2)$, bastante aproximado al real.

Posteriormente, el marqués Giovanni Poleni (1683-1761) en su tratado *De Castellis* (1718) ajusta aún más ese coeficiente de contracción y lo fija en un valor de 0,62, prácticamente igual al que se usa actualmente (Rouse e Ince, 1963). En efecto, aunque el valor de C_d depende tanto de la relación entre el área del orificio de salida y el área del depósito como de la viscosidad del agua (número de Reynolds), si esa relación es pequeña y el número de Reynolds es alto, es decir, las fuerzas viscosas son despreciables frente a las de inercia, su valor tiende a ser constante e igual a 0,61 (Losada, 2000).

Los trabajos de Jean Charles Borda (1733-1799), un matemático y astrónomo náutico francés, significaron un avance hacia la moderna fluidomecánica en la que ya hay que considerar el rozamiento en el movimiento de los fluidos, es decir, los llamados *fluidos reales* que constituyen un sistema bastante más complejo que el de los denominados *fluidos perfectos*, donde los efectos viscosos no son considerados. Esto le llevó a decir que “*los flujos de los fluidos reales son más sofisticados que el carácter más sofisticado de una señora*”.

En este sentido, Borda señala que la fricción o rozamiento en el orificio de salida reduce la velocidad de descarga a un valor algo más pequeño que la ideal del chorro dada por el teorema de Torricelli, lo que le permite distinguir diferentes coeficientes de desagüe, C_d , según la posición del orificio en el tanque de salida, un agujero situado cerca del fondo tiene un mayor C_d que uno situado más cerca de la superficie, o con arreglo a la forma de sus bordes, un orificio con los filos redondeados tiene un C_d más grande que uno con los bordes agudos (Tokaty, 1994, p. 82-84). Ya Borda fija en el 61% la reducción media del coeficiente de desagüe, C_d , para orificios con filos agudos.

Aunque el principio de Torricelli se escribe actualmente $v = \sqrt{2gh}$ como, hay que remarcar que durante al menos un siglo fue usado sin el factor (2g), donde g es la aceleración de la gravedad cuyo valor es de 9,81 m/s², aproximadamente, para la zona geográfica de España. Por lo tanto, Galileo y sus seguidores evaluaron el problema de la caída libre como proporcionalidades sin mirar el significado físico del factor de proporcionalidad (Rouse e Ince, 1963, p.62).

La relación de gasto correspondiente al desagüe por orificios adopta, actualmente, la forma (Losada, 2009):

$$Q = C_d \omega \sqrt{2gh}$$

donde: Q = caudal desaguado por el orificio (m³/s)

C_d = coeficiente adimensional de desagüe (0,61)

ω = área de la sección transversal de paso del orificio (m²)

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

h = profundidad del centro del orificio bajo la superficie libre en el depósito (m)

Lo anterior viene a demostrar que esta ecuación no pudo ser aplicada en esa forma con anterioridad a mediados del siglo XVIII ya que, por un lado, el factor (2g) no era considerado y, por otro lado, el coeficiente de desagüe no fue determinado con exactitud por Poleni y Borda hasta pocas décadas antes. En consecuencia, los valores referidos a medidas antiguas de caudal previos a esa fecha no son equiparables a los que pudieran haberse determinado con posterioridad a la misma (Pizarro, 2014). Además, se debe tener en cuenta que, aunque la comunidad científica tenía sus propios medios de

difusión y eran conocedores, aunque con cierto retraso, de los avances en su rama del saber, la aplicación práctica de los mismos sufría una notable demora que se podía cifrar en decenas de años e, incluso, en algún siglo.

Medidas antiguas de agua

Las medidas antiguas de agua, que se usaron tanto en España, como en los territorios de ultramar, antes de la aparición del sistema métrico decimal, fueron muy diversas, y con muy curiosos nombres: *paja*, *real*, *dobla*, *buey*, *surco*, *dedo*, *naranja*, *lenteja*, *garbanzo*..., y, aunque la misma denominación se usaba, a veces, en distintos lugares, no ocurría así con su equivalencia a nuestras actuales medidas que es altamente variable, de lo que se colige que no tenían un carácter universal. La *paja*, una de las más pequeñas, es la que se ha usado habitualmente como medida del agua en las ciudades, siendo de las pocas que existía en ambos territorios con el mismo nombre. En cambio, entre las más grandes, el *surco*, era la utilizada frecuentemente en el mundo rural.

Al movernos geográficamente, se encuentran diferentes nombres y definiciones que confirman la falta de un criterio único a la hora de su caracterización. Es posible, no obstante, encontrar rasgos iguales entre las distintas medidas que vienen a confirmar su correcto fundamento teórico, y un cierto origen común, pero que no son suficientes para hacer comparaciones numéricas entre ellas. En efecto, todas las medidas se definían sobre la base del desagüe a través de orificios de una determinada área, pero sin considerar la altura de agua sobre el centro del orificio, o carga, que, no obstante, sabían que debía ser constante, de ahí la disparidad de equivalencias encontradas. La raíz cuadrada de esta carga, de acuerdo con el teorema de Torricelli, representa la velocidad de salida que modifica la cantidad de agua que desagua el depósito en un determinado tiempo. También dicha altura afectaba a las relaciones entre las distintas medidas, que son múltiplos o divisores unas de otras, pero en proporción diferente en cada caso.

En la ciudad de Barcelona, especialmente, aunque también se usó en otras zonas de Cataluña, e incluso en regiones de su influencia como Nápoles, se tiene constancia desde 1482 de la medida denominada *ploma d'aigua*, pluma de agua (González Tascón, 1998, p.323). Estaba normalizada para el desagüe desde un depósito o arca de agua, donde se mantenía una carga de 14,5 cm, a través de un pequeño orificio de 0,59 cm. Aplicando la ecuación de Torricelli, la pluma equivale a 91 l/h.

En La ciudad de Madrid, la unidad básica era el *Real de Agua o Real Fontanero*, o agua que salía por un orificio cuyo diámetro coincidía con el de una moneda de un real, 1,35 cm, esto es, con una superficie de 1,43 cm². Al no conocerse la carga, hay que usar observaciones realizadas ya en el siglo XIX que nos proporcionan su valor como 134 l/h. También usaban como medida la *paja de agua* que equivalía a un 1/16 de un real fontanero, esto es, 8,38 l/h, que se corresponde con la definición dada por el DLE. Asimismo, se utilizó la *naranja o caña naranjero* que, según González Tascón (1998), corresponde al tamaño de la munición del cañón naranjero y equivale a 12 reales o 192 pajas.

La mejor información sobre medidas de agua en la España de los Austrias, se encuentra en un plano que se conserva en los archivos del Ayuntamiento de Sevilla, fechado en 1657, y que hace alusión a los repartimientos de las aguas de los Caños de Carmona desde los tiempos de los Reyes Católicos (ver figura 5).

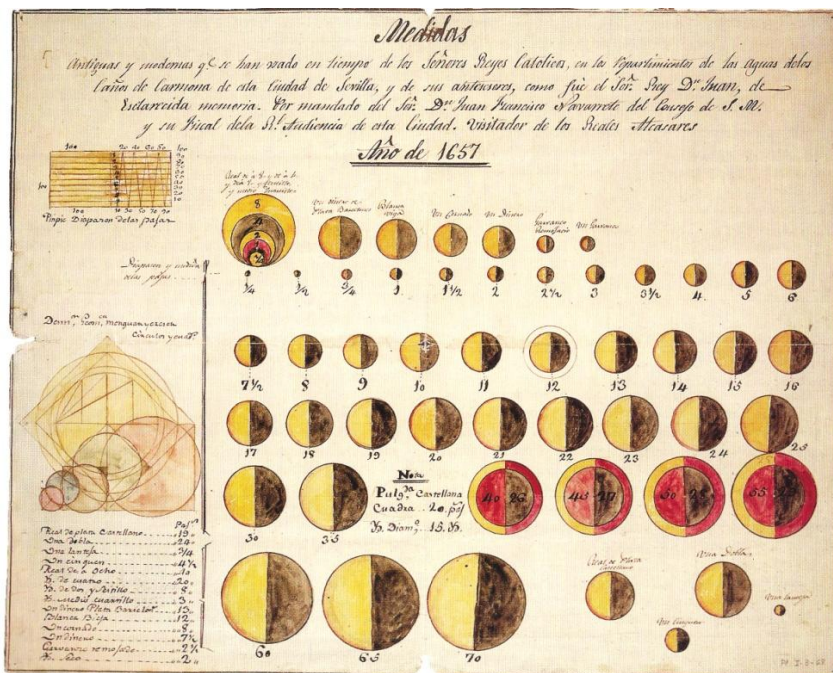


Figura 5. Unidades de medida hidráulica de la ciudad de Sevilla. (Fuente: Archivo municipal, 1657).

En este plano se dibujan las diferentes secciones de paso correspondientes a cada una de las unidades y, a su vez, todas estas medidas se refieren a una única unidad, la paja de agua (ver tabla 1).

Tabla 1. Número de pajas en cada unidad de medida, Sevilla, 1657. (Fuente: Archivo municipal)

Medidas	Número pajas
1 Real de plata castellano	19
1 Real de ocho	40
1 Real de a cuatro	20
1 Real de medio cuartillo	3
1 Real de dos y sestillo	8
1 Dobra	24
1 Lenteja	3/4
1 Cinquen	4 1/2
1 Dinero de plata barcelonés	13
1 Blanca "Bieja"	12
1 Cornado	8
1 Dinero	7 1/2
1 "Garvanzo" remojado	2 1/2
1 "Garvanzo" seco	2

Como se puede observar, ninguna de ellas coincide con el real de agua usado en Madrid que tenía 16 pajas.

En el centro del plano hay una doble equivalencia para la paja, por un lado, se dice que 20 pajas se desaguan a través de un orificio cuadrado de una pulgada castellana (2,321 cm) de lado, es decir, con una superficie de 5,387 cm², por otro lado, 15 pajas se evacuan a través de un orificio circular de una pulgada castellana de diámetro, es decir con una superficie de 4,229 cm². Se puede comprobar que el tamaño del orificio para una paja difiere ligeramente entre ambos casos, en el primero sería de 0,269 cm² y en el segundo de 0,282 cm², pudiéndose adoptar su valor medio, 0,275 cm², para la abertura de la paja de agua sevillana (González Tascón, 1998).

El cálculo anterior adolece de un pequeño error, teniendo en cuenta lo que ya decía Castelli en el siglo XVII sobre que los orificios de mayor tamaño descargaban proporcionalmente mayor caudal que los de menor tamaño. En efecto, al realizar los cálculos de lo que representa la paja cordobesa usando un aforador de 1869 (ver apartado siguiente) se comprobó que, por ejemplo, el área del orificio por el que se desaguaban 10 pajas era solo 7,8 veces mayor que el del orificio por que salía una paja. Aunque no se dispone de su conversión en unidades del sistema métrico decimal y, por tanto, no se puede establecer una equivalencia entre ambas pajas, el área del orificio de la paja sevillana (0,275 cm²) es mayor que el de la paja de agua madrileña (0,089 cm²), lo que induce a pensar que el caudal desaguado por ella sería también más grande. Así, y según Emasesa (1990), del citado plano se deduce que una paja equivale a 3.882 l/día o 0,045 l/s, aunque no explica cómo ha obtenido dicho valor que, en cualquier caso, no resulta evidente ni ha sido reseñado por otros autores.

A los territorios de Nueva España, llegaron también con el descubrimiento de América, las unidades de medida de caudales castellanas, conservando sus nombres y la forma en la que se calculaban. Los cuadros de equivalencias entre ellas y los tamaños de los orificios correspondientes a cada una, se han mantenido bastante constantes en los diferentes documentos y ordenanzas encontrados. Sin embargo, al establecer sus paridades con el sistema métrico decimal, los resultados obtenidos son muy dispares ya que se definían, al igual que sucedía en España, en función de la sección del orificio, exclusivamente, y no se tenía en cuenta la velocidad de salida o la carga de agua en el depósito.

Según Palerm y Chairez, (2002, p. 230), las medidas de agua y las equivalencias entre ellas en el territorio de Nueva España son algo diferentes a las usadas en España, aunque algunos nombres se repiten, real, paja, naranja (ver tabla 2).

*Tabla 2. Número de pajas en cada unidad de medida, Nueva España, siglos XVI-XIX.
(Fuente: Palerm y Chairez, 2002)*

<i>Medidas</i>	<i>Número pajas</i>
1 buey	20736
1 surco	432
1 naranja	144
1 real	18
1 pulgada cuadrada	16
1 dedo cuadrado	9

La memoria económica de la municipalidad de México publicada en 1830 recoge, por primera vez, equivalencias volumétricas durante un determinado tiempo de las medidas antiguas de agua. Los datos están basados en las mediciones realizadas por D. Miguel Constanzó en 1792, aunque en ellas no consta ningún razonamiento que justifique la conversión (Palerm y Chairez, 2002, p. 235). En cualquier caso, esta paridad se acepta con casi absoluta generalidad por autores e instrucciones posteriores. En concreto, Constanzó indica que una paja produce en cada minuto una libra o cuartillo de agua, es decir, 0,45 litros. Por lo tanto, una paja de agua equivale a 0,0075 l/s o 27 l/h. Al menos en México, el coeficiente Cd se introduce en la ecuación de Torricelli en 1846.

En Guatemala se estableció en 1931 que una paja de agua equivale a 2000 litros de agua en 24 horas, es decir, 0,0231 l/s o 83,33 l/h, lo que supone unas tres veces la paja de agua mexicana (Palerm y Chairez, 2002, p. 239).

En el norte de México y sur de Estados Unidos, y dentro del mundo del riego, las cantidades de agua se determinaron también a partir del tamaño de la abertura a través de la cual el agua se conducía desde el canal principal a la acequia. La unidad más grande de medida fue el *buey*, que, originariamente, se estimaba como la cantidad de agua que podía pasar a través de una pierna de buey en un minuto y que se estandarizó como un orificio de una vara cuadrada ($0,6987 \text{ m}^2$) que desagua 2.597 galones por minuto (163,83 l/s) (Meyer, 1996, p. 90). El buey se subdividía en *surcos*, equivalentes a 51 galones por minuto, y que se definía como la cantidad de agua necesitada para llenar una zanja media cavada por un arado simple. El surco se dividía, a su vez, en *naranjas*, 17,13 galones/min o 1,08 l/s, *reales* o *limones*, 2,14 galones/min o 0,135 l/s, y *pajas*, 1,18 galones/min o 0,0744 l/s. En la tabla 3 se muestra el número de pajas contenido en cada una de las diferentes medidas de agua.

Tabla 3. Número de pajas en cada unidad de medida, Norte de México-Sur de Estados Unidos, siglos XVIII-XIX. (Fuente: Meyer, 1996)

<i>Medidas</i>	<i>Número pajas</i>
1 buey	2200,8
1 surco	43,2
1 naranja	14,5
1 real	1,81

Se observa que, en este caso, las equivalencias de las diferentes medidas con las pajas están, aproximadamente, en una relación 1:10 con las equivalencias en el caso de las pajas mexicanas. Ello concuerda con el hecho de que una paja estadounidense es unas diez veces la paja mexicana.

La paja de agua cordobesa

También en Córdoba nuestros antepasados conocían la importancia de la altura de agua en un depósito sobre la cantidad de agua desaguada por un orificio practicado en su pared. Así, Pizarro (2014) menciona un documento relativo a las Aguas del Cabildo, fechado en 1604, que especifica que los orificios de donde se derivaba cada "*paja o pajas avía de tener dese lo alto dellas una quarta de una vara ordinaria de Cordova y las dichas pajas avían de estar assentadas todas en una línea a nivel y peso*

sin que se diga una de otra por de dentro ni fuera de la dicha arca". En definitiva, se tenía ya la seguridad de que manteniendo una carga constante, la cantidad de agua derivada por cada tubería que salía de un arca de agua solo dependía del diámetro de dicha tubería.

En el glosario que acompaña su libro sobre *Las Aguas de Córdoba* (en 1876), López Amo (1997, p. 88, 100) define la paja de agua como la medida que es la decimosexta parte del real de agua o fontanero, y equivale a 324 líneas cúbicas o a dos tercios de centímetro cúbico por segundo, es decir, 0,00067 l/s (0,04 l/min 2,4 l/h o 57,6 l/día). Aunque la definición de paja cordobesa concuerda con la de Madrid, la equivalencia es diferente y, en este caso, representa algo menos de un tercio de la primera. López Amo no justifica dicha equivalencia. No obstante, en otra parte de su libro, aclara que, para la justa distribución de las aguas, se disponía en el archivo municipal de *"una caldera con sus cisuras arregladas al patrón, la cual, llena de agua, se ha de mantener siempre con una cuarta sobre las cisuras"*, es decir, si se entiende que se refería a una cuarta de vara castellana serían 0,209 m (CEM, 1999).

López Amo era consciente, pues, que la carga afectaba también a la cantidad de agua desaguada y, que manteniendo constante dicha carga, se podía estandarizar la unidad de medida. Sin embargo, resulta extraño que su definición de paja cordobesa, ya en 1876, sea, exactamente, 100 veces inferior a la que se obtiene, posteriormente en este mismo trabajo, estudiando un aforador de la misma época, 1869, y con cargas de agua similares, entre 0,225 y 0,230 m.

Pizarro (2014) nos habla de dos aforadores que se usaban en Córdoba en la segunda mitad del siglo XIX. Por un lado, los maestros cañeros utilizaban en 1861 un punzón, datado en 1807, cuya descripción en un manuscrito de la época dice así *"una figura de bronce de forma cónica escalonada en secciones horizontales de forma cilíndrica, que representan por la del vértice la medida de una cuarta parte de paja de agua y por la de su base la respectiva a diez pajas del mismo líquido correspondiendo las secciones intermedias al número de unidades o fracciones que determina el diseño marginal tomado del referido patrón, para cuyo fácil manejo termina por un asón circular"* (ver figura 6).

Por otro lado, en la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba (Emacsa) se conserva un arca de agua, datada en 1869, que consiste en una caja de bronce semicircular con unas dimensiones de 42 cm de diámetro, 27 cm de ancho y 28 cm de profundidad. En la parte curva se abren 28 cisuras de diferentes tamaños y que corresponden, según la leyenda que hay sobre ellos, a $\frac{1}{4}$ de paja (4 orificios), $\frac{1}{2}$ de paja (2 orificios), 1 paja (6 orificios), 2 pajas (6 orificios), 5 pajas (5 orificios), y 10 pajas (5 orificios) (ver figura 7).

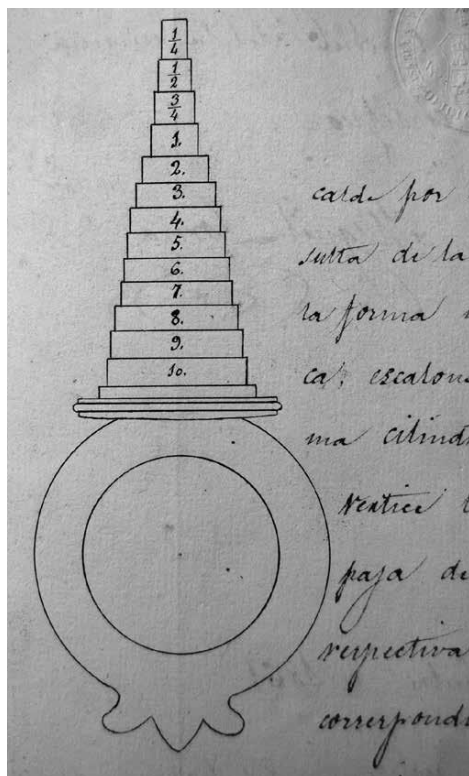


Figura 6. Esquema de punzón para medir el agua. Año de 1807 (Fuente: Pizarro, 2014).



Figura 7. Arca de agua, o aforador, conservada en la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba. Año de 1869 (Fuente: Pizarro, 2014).

Midiendo el diámetro de cada abertura y la carga de agua que hay sobre cada una de ellas, supuesto que se mantiene un nivel constante enrasando con la parte superior de la caja ya que el exceso de agua rebosaría, se puede calcular el caudal desaguado por cada orificio aplicando la ecuación completa de Torricelli. Los resultados muestran ligeras variaciones en los caudales obtenidos que se deben, por un lado, a diferencias en las superficies de las cisuras, cuyo valor medio es de $0,5583 \text{ cm}^2$ para el orificio de una paja y, por otro lado, a la diferente carga de vertido que aumenta levemente conforme el orificio es más pequeño.

En efecto, en la tabla 4 se muestran los valores medios correspondientes a la carga de vertido, h , área del orificio, ω , velocidad de salida, U , y caudal desaguado, Q , por cada cisura correspondiente a un determinado número de pajas del aforador de 1869. También se incluye una columna que muestra el cociente de áreas entre la de cada uno de los orificios y la de una paja. De esta última relación, se infiere que los fabricantes de esta arca de agua pudieron tener en cuenta la afirmación de Castelli y, de este modo, compensar el desagüe de un mayor caudal que, proporcionalmente, se desagua por los orificios de mayor tamaño. Sin embargo, más parece que se trata de un error al construir los agujeros pues los instrumentos utilizados no tenían la suficiente precisión. Tampoco hay que descartar que el coeficiente de desagüe, C_d , debería ser mayor para los orificios de mayor tamaño y, en nuestros cálculos, siempre se ha mantenido constante e igual a 0,61. El efecto sobre el caudal evacuado de las diferentes alturas de vertido es más atenuado pues se relaciona con la velocidad a través de la raíz cuadrada, de ahí que dichas velocidades de salida solo oscilen, ligeramente, entre 2,10 y 2,15 m/s. Todo ello se traduce en que el caudal unitario de una paja disminuye conforme aumenta el número de pajas del orificio, pero de forma casi inapreciable pues el coeficiente angular de la recta de ajuste es muy pequeño (-0,0019) (ver figura 8).

Tabla 4. Valores medios de altura, área, velocidad y caudal. Aforador de 1869.

Número pajas	Número cisuras	H (mm)	Ω (cm^2)	U (m/s)	Q (l/s)/paja	ω_n/ω_1
10	5	225,38	4,3574	2,103	0,0559	7,8
5	5	227,94	2,2876	2,115	0,0590	4,1
2	6	230,68	1,0146	2,127	0,0658	1,8
1	6	232,22	0,5583	2,135	0,0727	1,0
½	2	232,93	0,2687	2,138	0,0707*	0,48
1/4	4	235,92	0,1452	2,148	0,0761	0,26

(*) Una muestra escasa, solo dos orificios, puede ser la causante de este descenso de caudal unitario aún cuando el número de pajas disminuye

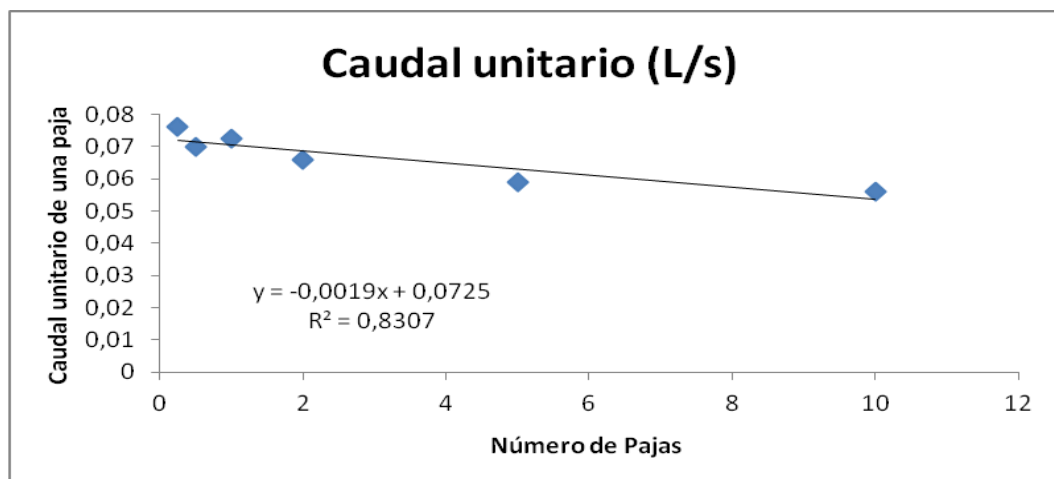


Figura 8. Caudal unitario de una paja vs número de pajas por orificio. Aforador de 1869.

El valor medio de la paja cordobesa resultante de este ensayo se sitúa en 4 l/min (0,067 l/s o 240 l/h o 5760 l/día), valor que es corroborado por los siguientes hechos o documentos:

- Emacsa sigue cobrando en pajas el suministro de agua a la casa nº 6 de la calle Ramírez de las Casas Deza. La equivalencia que usa es de 4 l/min.
- Anuncio de la Sociedad de Partícipes de las Aguas que fueron del Cabildo Eclesiástico en el periódico local de 4 de agosto de 1905, en el que se establece también que una paja de agua son 4 l/min.
- Ordenanza fiscal reguladora de la tasa por el suministro de agua potable en Carcabuey (Boletín Oficial de la Provincia de Córdoba de 13 de septiembre de 2005, p. 4764) donde también se establece la equivalencia de la paja de agua en 4 l/min.

En la tabla 5 se presenta un resumen de los diferentes valores que en los distintos territorios se le han asignado a la unidad *paja de agua*. Se observa una gran diversidad de valores consecuencia, por un lado, de la falta de una ecuación de equivalencia y, por otro lado, de los criterios heterogéneos que se han seguido para la asignación de esas equivalencias que, en muchos casos, son desconocidos. Destaca por su elevada cuantía el de la paja de agua cordobesa lo que podría tener su explicación en el supuesto, nada improbable, de que la ecuación de Torricelli fuera usada todavía en 1869 sin el coeficiente de gasto, C_d , ni el factor $\sqrt{2g}$. En ese caso, la cuantía de la paja cordobesa se obtendría dividiendo el valor anterior por 2,7 con lo que resultaría que equivaldría a 1,48 l/min (0,025 l/s o 88,8 l/h o 2131 l/día), más cercano a los otros valores de las pajas de agua.

Tabla 5. Caudal de la paja de agua en distintas poblaciones y territorios.

<i>Ciudad/ Territorio</i>	<i>Sección del orificio de una paja de agua</i>	<i>Caudal l/día</i>	<i>Cauda l l/hora</i>	<i>Cauda l l/min</i>	<i>Cauda l l/s</i>	<i>Referencia</i>
España/ Madrid	----- -	200	8,33	0,139	0,0023	Diccionario de la Lengua Española
Madrid (siglos XVII- XVIII)	1,43 cm ²	201,12	8,38	0,14	0,0023	González Tascón (1998)
Sevilla (1657)	0,275 cm ²	3882	161,75	2,70	0,0450	González Tascón (1998)/Emases a (1990)
México (1830)	----- -	648	27	0,45	0,0075	Palerm y Chairez (2002)

Tabla 5. Caudal de la paja de agua en distintas poblaciones y territorios.
(continuación)

<i>Ciudad/ Territorio</i>	<i>Sección del orificio de una paja de agua</i>	<i>Caudal l/día</i>	<i>Cauda l l/hora</i>	<i>Cauda l l/min</i>	<i>Cauda l l/s</i>	<i>Referencia</i>
Suroeste de Estados Unidos (siglos XVIII- XIX)	----- -	6428	267,84	4,46	0,0744	Meyer (1996)
Guatemala (1931)	----- -	2000	83,33	1,39	0,0231	Palerm y Chairez (2002)
Córdoba (1869)	0,5583 cm ²	5760	240	4	0,0667	Pizarro (2014) /Ecuación gasto completa
Cordoba (1869)	0,5583 cm ²	2131	88,8	1,48	0,0247	Pizarro (2014) /Ecuación gasto incompleta
Córdoba (1870)	----- -	2000	83,3	1,39	0,0231	Pizarro (2014) /Archivo Histórico Córdoba
Córdoba (1876)	----- -	57,6	2,40	0,04	0,0006 7	López Amo (1997)

Viene a corroborar lo anterior un expediente de 1870 que consta en el archivo histórico municipal de Córdoba (Pizarro, 2014). En él se pretendía “*la adopción de una medida de agua en sustitución de la llamada paja, idea cuya realización es muy conveniente y hasta indispensable, pues sabido es que la paja de agua es una medida arbitraria, variable y elástica cuya entidad nadie positivamente conoce*”, mencionándose que “*en esta capital el que compra una paja de agua solo recibe 2 metros cúbicos en 24 horas*”. Curiosamente, 2000 l/día es muy parecida a la cantidad de 2131 l/día que se acaba de encontrar si el coeficiente y las constantes son eliminadas de la ecuación de Torricelli.

Conclusiones

En un principio, la humanidad estaba interesada en medir la cantidad de agua que llevaba una corriente, principalmente por las inundaciones que provocaba en las orillas de los ríos. Evitando los efectos devastadores de las avenidas, el agua servía para regar las parcelas vecinas y, a mayor cantidad, de caudal o calado, más superficie se podía humedecer y con más agua.

Posteriormente, y cuando el agua se derivó del cauce fluvial hacia depósitos de los que partían las tuberías o canales, la preocupación fue distribuirla equitativamente entre los usuarios fijando, previamente, un orden de prioridad. En general, se estableció una correspondencia biunívoca caudal-sección de paso que no permitía una extrapolación universal de los resultados pues faltaba la consideración de la velocidad del flujo. No obstante, el objetivo de un reparto equitativo se conseguía manteniendo constantes las cargas de agua en los depósitos de distribución.

Es a partir del Renacimiento, el momento en el que las ideas se traducen en fórmulas y se cuantifican las variables, cuando, poco a poco, y a lo largo de varios siglos, las contribuciones de grandes científicos dan la forma correcta a las ecuaciones de aforo tal como hoy día se les conoce, de modo que a principios del siglo XVIII ya se puede decir que el proceso ha concluido.

No obstante, hay que esperar al siglo XIX, e incluso hasta el siglo XX, al menos en la ciudad de Córdoba, para que estos avances sean incluidos en la cotidianeidad y sean aplicados para conseguir una correcta distribución de agua. Para entonces, las medidas ya se podían hacer en unidades comparables del sistema métrico.

Mientras tanto, coexistieron múltiples medidas de agua, de las que la paja de agua es su mayor exponente, que, aun conservando su nombre, no representaban lo mismo en ubicaciones geográficas diferentes, ni tan siquiera entre ciudades relativamente próximas. Desde el punto de vista conceptual, no se había avanzado desde la época romana. No obstante, se era consciente de que lo importante no era el valor absoluto de la medida sino el relativo, de modo que aunque la paja de agua era una medida arbitraria, cuyo valor era desconocido, se sabía establecer unas condiciones de distribución que permitían calcular, con absoluta seguridad, sus múltiplos y divisores. En el caso de Córdoba, se ha calculado que su valor equivale a 4 l/min usando un aforador datado en 1869.

Bibliografía

- AL-GHAFRI, A. y NAGASAWA, T. 2007. *Irrigation scheduling of aflaj of Oman: methods and modernization*. University of Hokkaido. www.inweh.unu.edu/inweh/drylands/Publications/AlGhafri.pdf, 19 p.
- BONNIN, J. 1984. *L'eau dans l'antiquité. L'hydraulique avant notre ère*. Eyrolles. París, 450 p.
- CEM (Centro Español de Metrología). 1999. *Pesas y medidas españolas antiguas. Patrones del siglo XIX anteriores al sistema métrico*. Ministerio de Fomento. Madrid.
- DI FIDIO, M. y GANDOLFI, C. 2011. "Flow velocity measurement in Italy between Renaissance and Risorgimento". *Journal of Hydraulic Research*, 49(5):578-585.
- EMASESA. 1990. *El agua en Sevilla*. Guadalquivir ediciones. Sevilla, 285 p.
- FAHLBUSCH, H. 1987. "Vitruvius and Frontinus. Hydraulics in the Roman period". En: G. Garbrecht (Ed.). *Hydraulics and hydraulic research. A historical review*. A.A. Balkema. Rotterdam, pp: 23-32.
- GARBRECHT, G. 1987. "Hydrologic and hydraulic concepts in antiquity". En: G. Garbrecht (Ed.). *Hydraulics and hydraulic research. A historical review*. A.A. Balkema. Rotterdam, pp: 1-22.
- GLICK, T.F. 1988. *Regadío y sociedad en la Valencia medieval*. Valencia.
- GONZÁLEZ TASCÓN, I. 1998. "Abastecimiento de agua a las ciudades". En: *Felipe II. Los ingenios y las máquinas. Ingeniería y Obras Públicas en la época de Felipe II. Sociedad Estatal para la Conmemoración de los Centenarios de Felipe II y Carlos V*, pp: 323-331.
- LEVI, E. 1987. Evangelista Torricelli. En: G. Garbrecht (Ed.). *Hydraulics and hydraulic research. A historical review*. A.A. Balkema. Rotterdam, pp: 93-102.
- LEVI, E. 2001. "El agua según la ciencia. Avances en Hidráulica", 8. *AMH-IMTA*. 677 p. (primera edición de Conacyt-Ediciones Castell Mexicana de 1989).
- LÓPEZ AMO, J. 1997. *Las aguas de Córdoba. Descripción del origen y curso de las aguas potables en 1876*. Ediciones de la Posada. Ayuntamiento de Córdoba, 102 p.
- LOSADA, A. 2009. *El riego. Fundamentos hidráulicos* (4ª edición). Mundi Prensa, Madrid, 461 p.
- MACCAGNI, C. 1987. "Galileo, Castelli, Torricelli and others. The Italian school of hydraulics in the 16th and 17th centuries". En: G. Garbrecht (Ed.). *Hydraulics and hydraulic research. A historical review*. A.A. Balkema. Rotterdam, pp: 81-88.
- MALISSARD, A. 1996. *Los romanos y el agua*. Editorial Herder. Barcelona, 303 p.
- MCNOWN, J.S. 1976. *When time flowed. The story of the Clepsydra*. La Houille Blanche, 5:347-353.
- MEYER, M.C. 1996. *Water in the Hispanic Southwest. A social and legal history, 1550-1850*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, 209 p.
- MOUSSAOUI, A. 2011. "El agua en el Sáhara, técnicas ancestrales y nuevas necesidades (Argelia)". En Ayeb, H. (dir.). *El agua en el mundo árabe: percepciones globales y realidades locales*. Casa Árabe-IEAM, pp: 237-257.
- PALERM, J. y CHAIREZ, C. 2002. "Medidas antiguas de agua. Relaciones". *Revista del Colegio de Michoacán*, 23(92):227-251.
- PIZARRO BERENGENA, G. 2014. *El abastecimiento de agua a Córdoba*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. Córdoba, 405 p.
- ROLDÁN-CAÑAS, J. y MORENO-PÉREZ, M.F. 2010. "Water engineering and management in al-Andalus". En: Cabrera, E. y Arregui, F. (eds.). *Water*

- engineering and management through time. Learning from history.* CRC Press/Balkema. Leiden (Holanda), pp: 117-130.
- ROUSE, H. e Ince, S. 1963. *History of Hydraulics.* Dover Publications, New York, 269 p.
- SIMÓN CALERO, J. 1996. *La génesis de la mecánica de fluidos.* Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 692 p.
- SOLÍS, C. 1990. *Los caminos del agua.* Biblioteca Mondadori. Madrid, 220 p.
- TOKATY, G.A. 1994. *A history and philosophy of fluid mechanics.* Dover Publications. New York, 241 p. (primera edición de Henley on Thames en 1971).
- VIOLLET, P.L. 2007. *Water engineering in ancient civilizations.* IAHR. Madrid, 322 p.
- WILKINSON, J.C. 2013. *Water and tribal settlement in south-east Arabia. A study of Aflaj of Oman.* Georg Olms Verlag. Hildesheim, 275 p. (primera edición de Oxford University Clarendon Press en 1977).