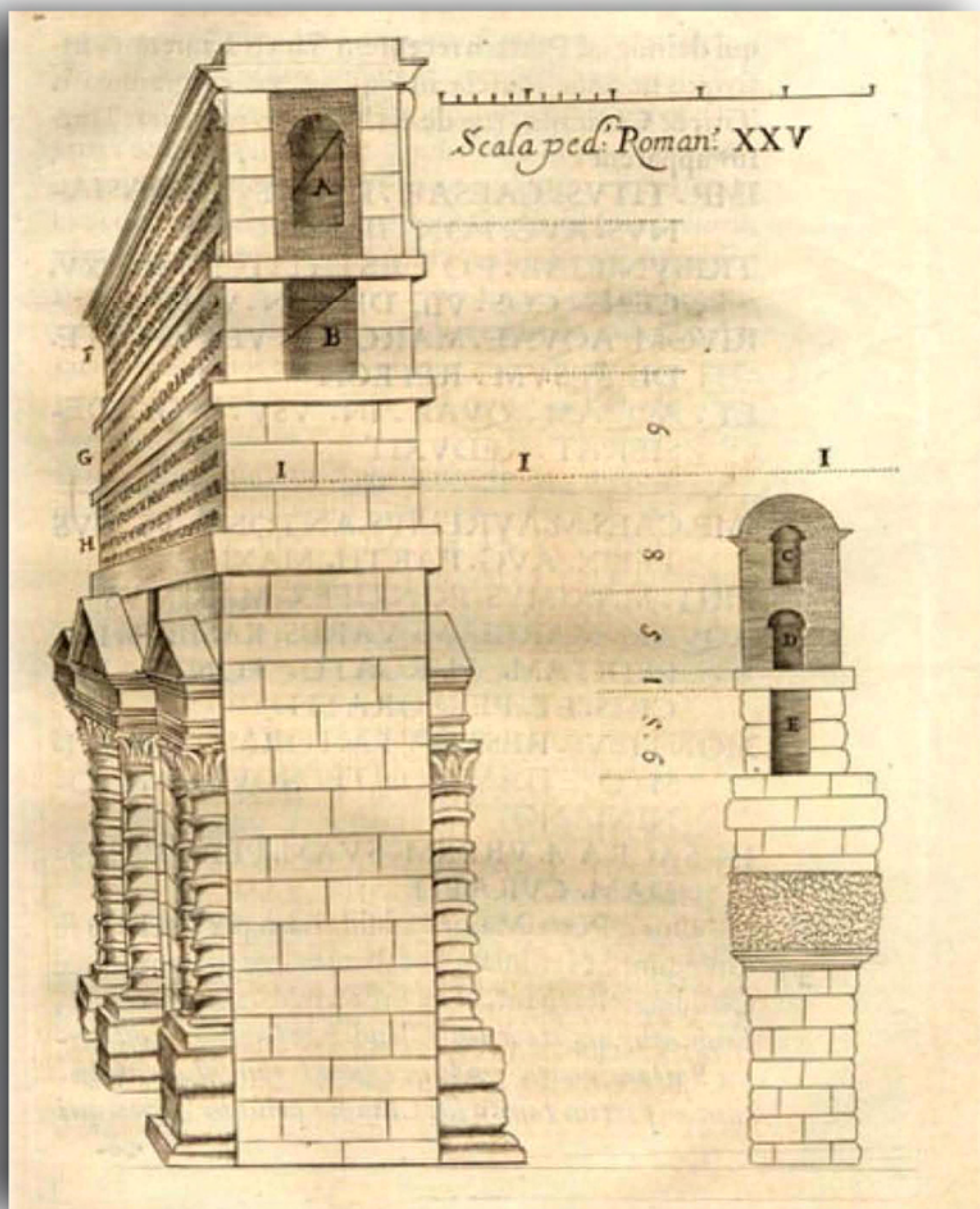




LA QUINARIA DE FRONTINO UN ESTADO DE LA CUESTIÓN

Juan Manuel Sánchez Valderrama



INSTITUTO DE
ESTUDIOS CEUTÍES - 2020

LA QUINARIA DE FRONTINO

UN ESTADO DE LA CUESTIÓN

Juan Manuel Sánchez Valderrama



INSTITUTO DE ESTUDIOS CEUTÍES
CEUTA 2020

La imagen que sirve de portada se ha tomado del texto de R. Fabretti, *De Aquis et Aquaeductibus veteris. Romae Dissertationes tres*, Romae 1680, Diss I, p. 20.

© TEXTO: Juan Manuel Sánchez Valderrama, 2020

© EDITA: INSTITUTO DE ESTUDIOS CEUTÍES

Apartado de correos 593 • 51080 Ceuta

Tel.: + 34 - 956 51 0017

E-mail: iec@ieceuties.org

www.ieceuties.org

Comité editorial:

Gabriel M^a Fernández Ahumada • José Luis Ruiz García

José María Campos Martínez • Santiago Ramírez Fernández

Fernando Villada Paredes • María Jesús Fuentes García

Jefe de publicaciones:

Saúl Yubero Hierro

Diseño y maquetación:

Enrique Gómez Barceló

Realización:

Enrique Gómez Barceló

ISBN: 978-84-16595-70-9

Depósito Legal: CE 48- 2019

Quedan reservados todos los derechos:

Esta publicación no puede ser reproducida, ni en todo ni en parte, ni registrada en, ni tramitada por, sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímica, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia, o cual otro, sin permiso previo del Instituto de Estudios Ceuties.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. BASES DE PARTIDA	13
1.1. Premisas técnicas básicas.....	15
1.2. Consideraciones preliminares	15
CAPÍTULO 2. LAS FUENTES PRIMARIAS	19
2.1. Marco Vitrubio Polión (circa 70-15 a.C.).....	21
2.2. Herón de Alejandría (siglo I d.c.).....	22
2.3. Cayo Plinio Segundo (23-79 d.C.)	23
2.4. Sexto Julio Frontino (40-103 d.C.).....	25
CAPÍTULO 3. LAS FUENTES SECUNDARIAS	29
3.1. Baron de Prony (Gaspard Riche)	31
3.2. J. B. Rondelet	35
3.3. Anónimo.....	40
3.4. Rodolfo Lanciani.....	43
3.5. Eugène Belgrand	44
3.6. Clemens Herschel.....	52
3.7. Claudio Di Fenizio	56
3.8. Thomas Ashby.....	59
3.9. Deane R. Blackman.....	61
3.10. Carlos Fernández Casado.....	64
3.11. Pietrantonio Pace.....	65
3.12. Trevor Hodge	66
3.13. Harry B. Evans	68

3.14. Rabun Taylor	69
3.15. R. H. Rodgers	71
3.16. Christer Bruun	72
3.17 José Manuel de la Peña Olivas	74
CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	95
WEBGRAFÍA	99
ÍNDICE DE TABLAS	103

LA *QUINARIA* DE FRONTINO
UN ESTADO DE LA CUESTIÓN

INTRODUCCIÓN

El arte de conducir las aguas supone, para los hombres de la antigüedad, todo un reto tecnológico en el que se aúnan la capacidad para alumbrarlas, guiarlas y almacenarlas para su posterior uso, ya sea este regar los campos o consumo doméstico.

Vitrubio nos ilustra en el modo de encontrarlas y evaluarlas para conocer su calidad. Plinio nos habla de las fuentes, de sus diferentes propiedades y del uso que los hombres hacían de ellas desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, es Frontino el que nos transporta hasta su ciudad, a su época, el que es capaz de trasladarnos, a través de un detallado informe de carácter técnico, sin ser él mismo *architectus*, tan sólo con su curiosidad, su capacidad de síntesis, su rigurosidad y su escritura, sucinta, y certera, el que nos muestra el vasto panorama del abastecimiento urbano a la ciudad más importante del orbe, su capital, aquella para la que sus ancestros habían procurado el imparable desarrollo de todo un imperio, del que se sienten herederos y deudores. Frontino es un patricio de la vieja escuela, se enfrenta a su trabajo, sea cual sea este, con determinación y trata por todos los medios de no ser una simple figura decorativa, en manos de lo que él mismo denomina la familia acuaria. Gracias a su esmero y dedicación hemos sido capaces de reconstruir, piedra a piedra, el complejo entramado que supone el mantenimiento y conservación de una vasta red de canales, tuberías y depósitos.

Sería lícito pensar que debería haber sido alguien como Vitrubio el trasmisor ideal, dada su condición de *architectus*, de tan amplios conocimientos. Sin embargo es un profano el que nos alumbra, desde una perspectiva aséptica y poco dada al lenguaje ampuloso, el que de forma ordenada y metódica trata un asunto de complejidad contrastada.

También es Frontino, en su afán casi diría que de contable, el que nos revela información que de ninguna otra fuente ha llegado hasta nosotros.

La opacidad que los autores de la antigüedad muestran a la hora de afrontar temas de carácter técnico tiene muy pocas excepciones, al menos entre lo que conocemos, y este trabajo de Frontino es una de ellas.

Lo que todo este caudal de información ha supuesto para los investigadores modernos se ha traducido en una miríada de valiosos estudios, que han demostrado lo acertado de sus descripciones y aportaciones para el conocimiento de un aspecto de trascendental importancia en el desarrollo del entramado urbano, como es el abastecimiento de agua corriente.

Pero también ha significado la entrada en escena de otro tipo de estudiosos, distinto del historiador. Así, los ingenieros de los siglos XIX, XX y XXI, han descubierto un reto, que se ha traducido en trabajos de carácter puramente técnico, al tratar de evaluar la unidad de medida que, para el autor romano, es la base de cálculo de los caudales aportados por los nueve acueductos que alimentaban la urbe.

Durante los últimos doscientos años, reputados ingenieros han tratado de demostrar el acierto de sus conjeturas a escépticos historiadores, fascinados por el problema que el romano propuso hace dos mil.

El planteamiento es sencillo: el caudal que transporta cualquier canal o conducto es el producto de la sección por la velocidad a que circula el agua en su interior.

Tal concepto encierra en sí mismo una importante dificultad: la velocidad. Y ello es debido a que esta depende de factores como la pendiente, la presión o la rugosidad de las paredes, pero también de si se trata de una tubería estanca o un canal abierto.

Se pueden determinar estos factores mediante fórmulas empíricas, que tratan de aproximarse al valor real, a través de coeficientes de corrección que tengan en cuenta los distintos parámetros empleados.

Pero estas fórmulas físico-matemáticas son producto de la experiencia, y la bondad de sus resultados depende en gran medida de su capacidad para reflejar la realidad de las condiciones reales de funcionamiento.

Frontino, como lego en la materia, simplifica el tratamiento que da al comportamiento del fluido en movimiento; para saber cuál es el caudal le es suficiente con conocer la superficie que ocupa, obviando la velocidad, y ello a pesar de que él mismo afirma que esta hace variar el resultado. De modo que los valores que nos hace llegar se basan únicamente en el factor sección, de la que nos detalla, con su característica minuciosidad, los diferentes calibres y su correspondiente capacidad, para lo que aplica como unidad de medida la *quinaria*.

Ciertamente, aconseja una determinada pendiente para los canales, pendiente que también recoge Vitrubio y que, presumiblemente, copia Plinio. Pero no siempre ello se respeta, como es posible constatar en los tramos que han sobrevivido.

De lo antedicho podría aseverarse que, dadas las dificultades, el problema es irresoluble, y con ello quedaría zanjado el asunto. Sin embargo, lo cierto es que todos estos obstáculos sólo han servido de acicate para numerosos estudiosos, que se han aproximado al tema desde diferentes ópticas, con resultados que muestran que, a pesar de las incógnitas que presenta, sí es posible una razonable aproximación, como tendremos ocasión de comprobar a lo largo de este estudio.

La pregunta que se plantea entonces es: ¿Cuál es la pretensión última de este trabajo? Y la respuesta viene dada precisamente por la larga y profunda controversia que, como he indicado más arriba, el tema ha venido suscitando en los últimos doscientos años.

Y es esa controversia la que me ha llevado directamente a tratar de averiguar qué apoyos tiene cada una de las autoridades que, a lo largo del tiempo, se han asomado a esta cuestión.

Resulta curioso observar cómo en algunos trabajos recientes se pasa de puntillas sobre el tema, dando como bueno el valor comúnmente aceptado, y sin más soporte crítico que el de mencionar, de forma acertada o no, la fuente secundaria de procedencia, apoyándose de paso en Frontino para sustanciar su uso. A primera vista, parece un tanto arriesgado utilizar una información de la que apenas se conoce su procedencia.

Veamos algunos ejemplos de utilización de la *quinaria* en estudios recientes, realizados en España:

En el texto de Ventura Villanueva sobre el abastecimiento a la Córdoba romana, se calcula, utilizando la fórmula de Manning, un caudal medio para el acueducto de Valdepuentes de 23.407,20 m³/día, para un área mojada de 2820 cm² (47x60 cm), siendo el área de una *quinaria* de 4,191 cm², de lo que resultan un total de 673 *quinarias* (Ventura, 1995: 38). El valor medio de la *quinaria* quedaría en 34,78 m³/día.

Siguiendo el mismo método, el acueducto de Arroyo Pedroche dispondría de un caudal medio de 12.129 m³/día, para un área mojada de 3.000 cm² (50x60 cm), obteniéndose 716 *quinarias* (Ventura, 1995: 57). El valor medio de la *quinaria* sería en este caso de 16,94 m³/día.

Como puede observarse, los resultados no son congruentes, pues para un mayor volumen resulta un menor número de *quinarias*. Así lo reconoce el propio autor al afirmar:

“Ahora bien, debemos reparar en la inconsistencia del cálculo, derivadas del sistema de medición romano de la quinaria” (Ventura, 1995: 57)

La traducción de Tomás González Rolán, que he empleado para este trabajo, en nota al pie concreta:

“El quinario, según una estimación aproximada, representaba 40,6 m³/día cada 24 horas” (Frontino, 1985: 39)

Y es con este calor con el que convierte de *quinarias* a metros cúbicos el suministro de agua a la ciudad.

En el trabajo realizado sobre el acueducto romano de *Caesaragusta* se recoge:

“La unidad para medir cantidades de agua que empleaban los romanos era la quinaria, cuyo valor exacto es muy difícil de establecer con cierta precisión, y cuya discusión puede verse con detalle en Bruun. El problema radica, una vez más, no en la sección de la tubería de una quinaria –que corresponde a un diámetro interior de 2,3 cm– sino en la presión hidrostática con que se mide, o lo que es lo mismo, la velocidad de salida del agua. Si consideramos una columna de agua comprendida entre 10 y 16 cm, la quinaria oscila entre 38 y 47,3 m³/día .

Tomando la quinaria como 40 metros cúbicos/día, el sifón romano de Zaragoza proporcionaba una 283 quinarias.” (González Tascón & Vázquez de la Cueva, 1994: 47)

El texto que a continuación reseñamos forma parte de un estudio general sobre el agua en el *Conventus Gaditanus*, en concreto en su primer capítulo, en el que da un breve repaso al abastecimiento urbano en la antigüedad romana. En este caso no se entra en mayores disquisiciones:

“...Aportaba un caudal de 1.206 quinarios, equivalentes a 49.916 m³ diarios...” (Lomas Salmonte, 2009: 23).

De la división de ambos términos se determina el valor de la *quinaria* en 40,39 m³/día.

CAPÍTULO 1

BASES DE PARTIDA

1.1.- Premisas técnicas básicas

Lo que a continuación presentamos no es, ni pretende ser, un trabajo de ingeniería. Es un estudio histórico sobre las bases que sustentan el valor que habitualmente se utiliza para el caudal.

En todo momento se ha tratado de reducir al mínimo posible el uso de aparato matemático o físico. No obstante, al tratarse de un concepto de hidráulica, es preciso conocer, al menos, el lenguaje utilizado y su traducción.

Un canal abierto es aquel por el que fluye un líquido, a causa de la propia pendiente del canal, en condiciones de presión atmosférica. Las características que lo definen son:

- **Calado (y):** Altura de la lámina de agua en una sección transversal.
- **Anchura superior de la sección (B):** Anchura de la superficie libre de fluido en el canal.
- **Área mojada (A):** Superficie de la sección transversal que ocupa el agua ($y \times B$).
- **Perímetro mojado (Pm):** Longitud de la pared y solera del canal que está en contacto con el agua ($B + 2y$).
- **Radio hidráulico (Rh):** Relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado del canal ($A / (B + 2y)$).
- **Pendiente del canal (I):** Altura que desciende el canal por metro lineal, se puede expresar en % y en tanto por mil.

1.2.- Consideraciones preliminares

El planteamiento y la orientación de este estudio se ha hecho bajo la premisa de que, tras el concepto de *quinaria*, es posible sustanciar un conjunto de ideas que han servido y sirven de base para el ulterior cálculo de poblaciones en la antigüedad, a través de los volúmenes de agua suministrada.

Ciertamente resulta muy complejo convertir la medida de *quinaria* a las actuales. Ello ha dado lugar a diferentes interpretaciones en las que se han mezclado, con más o menos fortuna, las ideas y conocimientos de ingenieros e historiadores.

Hemos de partir, en primer lugar, de las fuentes primarias, que son al fin y a la postre, el único sostén válido para iniciar el análisis. Así entendemos que se hace preciso relativizar su valor, para con ello poder discernir qué hay detrás del conocimiento que en la antigüedad se tenía del abastecimiento de agua a las numerosas ciudades, existentes o de nueva planta, que compusieron un proyecto unificador sin parangón, en que el adecuado suministro del líquido elemento se configuró como una prioridad de carácter básico, sin la cual no era posible la misma existencia del concepto urbano, tan arraigado en los modos de vida de Roma.

Es este por tanto un pilar sin el que el ideal mismo del Imperio no se sostendría, y sin el que no podríamos estar hablando de un modelo único de desarrollo, implantado con éxito en extremos opuestos del Imperio.

Todo ello parte del conocimiento que nos ha llegado gracias a autores como Herón de Alejandría, Plinio, Vitrubio o Frontino. Ellos son, pues, nuestras fuentes primarias para tratar de conocer el modo en que se puso en pie todo el esfuerzo edilicio, encaminado a la captación, transporte y suministro a la población, en condiciones adecuadas de salubridad, de agua en cantidades equiparables a los actuales suministros urbanos.

Basándonos en estos autores, los estudios sobre cada uno de los aspectos que señalan en sus escritos, han servido de punto de partida para que una nutrida legión de estudiosos dedique tiempo y esfuerzo a tratar de desentrañar los métodos, sistemas y procesos que condujeron al avance del poder civilizador romano, allá donde terminara implantándose.

Este conjunto de estudiosos abarca un amplio espacio temporal, en el que tanto las ideas como los modelos han avanzado de manera significativa, hasta permitirnos realizar análisis complejos de una realidad que, en muchos casos, aun nos sorprende por su dificultad técnica, por su atrevimiento y, cómo no, también por su belleza.

Uno de los aspectos estudiados, repetido en bastantes ocasiones y que ha supuesto un importante objeto de controversia, a la vez que un escollo para conocer realmente los volúmenes de agua que se movían a diario en las ciudades romanas, es la unidad de medida que Frontino nos ha legado.

La *quinaria* no es más que una unidad de volumen (aunque también esto es objeto de controversia, como veremos) aplicada al movimiento del agua en canales y tuberías, es decir, en conducciones a lámina abierta o en conductos cerrados.

Los primeros estudios, más o menos rigurosos, se inician a principios del siglo XIX, y si bien para muchos se trata de un caso cerrado, con la conclusión de que no es posible la comparación directa con nuestros actuales parámetros de medida de caudal, lo cierto es que en numerosos textos, estudios e incluso tesis doctorales, se siguen utilizando valores de comparación que dan por bueno, sin entrar en consideraciones, los dígitos calculados siguiendo modelos teóricos y premisas que no siempre es posible suscribir.

Puesto que el grado de aceptación de algunos de esos valores es alto, y su utilización intensiva, este trabajo pretende desenmarañar el proceso que diferentes autores han seguido para obtener este o aquel resultado, tratando de no entrar en estériles discusiones acerca de la bondad del modelo, pero sí en lo certero del análisis lógico y conceptual que les ha llevado a proponer valores que, hay que admitirlo, se mueven en una horquilla demasiado amplia como para ser medianamente admisibles.

Bien es cierto que esta horquilla es consecuencia, en muchos casos, del conocimiento técnico disponible en el momento histórico que se realizó, y precisamente por ello, y para evitar caer en la tentación de llevar a cabo actos de fe, este trabajo presenta, en primera instancia, el proceso mental y los resultados a los que cada uno de los investigadores llegó en su momento, apoyado en sus propios comentarios al respecto, en sus premisas y, en su caso, en el aparato matemático empleado.

Todo ello propicia un amplio abanico de respuestas a la misma pregunta: ¿Cuál es el equivalente actual en metros cúbicos de la *quinaria* de Frontino?

Algunas son de lo más peregrinas, pues están basadas en la pura especulación, otras de lo más coherente, ya que se sustentan en la mecánica de fluidos.

Hay quien parte de la idea, como ya comentábamos, de la imposibilidad de su cálculo, apoyándose para ello en las dificultades para plasmar un modelo válido de comportamiento, dada su dependencia de factores variables como la pendiente, la rugosidad o la carga hidráulica, factores sin los que resulta inexacto cualquier cálculo que pueda realizarse.

También se dan casos en los que no existe siquiera el más mínimo cuestionamiento, pues el valor aceptado es aquel que resulta más convincente para el que lo suscribe, dándose ejemplos en los que los errores determinan extrañas conclusiones, como es el caso del cálculo de poblacional que, en función de este valor, revela metrópolis inviables.

En cualquier caso, este análisis, en el que los autores se suceden siguiendo el espacio temporal en el que han vivido, pretende en última instancia obtener un cuadro que permita a quien quiera emplear sus resultados, hacerlo de forma cohe-

rente y consistente, así como consciente del carácter relativo de los valores que se pueda llegar a utilizar, a la vez que trata de conocer, de primera mano, lo expresado por cada uno de los más importantes eruditos que se han ocupado del tema.

El hecho de que en su mayor parte se trate, en primera instancia, de autores italianos, franceses e ingleses para pasar posteriormente el testigo a los norteamericanos, dificulta en cierta medida tanto su localización como su interpretación, por lo que es necesario reseñar que, en determinados casos, ha sido francamente difícil encontrar algunos de los textos originales, mencionados en muchos manuales, y poco difundidos, más allá de las bibliotecas especializadas de cada país, lo que ha hecho necesario que se recurriese al préstamo interbibliotecario de carácter internacional, por lo que también quisiera expresar mi agradecimiento a la Biblioteca del Estado en Ceuta por la colaboración prestada.

A pesar del abrumador peso de autores foráneos, no he querido dejar fuera algunos trabajos de autores autóctonos, pues con ello he procurado verificar hasta qué punto el tema tratado es objeto de estudio o análisis. Sus resultados, junto con la visión global resultante, pertenecen al campo de las conclusiones.

CAPÍTULO 2

LAS FUENTES PRIMARIAS

2.1. Marco Vitrubio Polión (circa 70-15 a.C)

Se han utilizado para este trabajo la versión original del texto latino¹ así como una de las traducciones al castellano (Vitrubio, 2000) existentes.

En su descripción, Vitrubio nos explica cuál debe ser la pendiente óptima (1/4 de pulgada cada 100 pies); se entiende que para canales a lámina abierta.

“Si canalibus ut structura fiat quam solidissima solumque rivi libramenta habeat fastigata ne minus in centenos pedes sicilico...” (Vit. De arq. VI, I).

“Si la conducción se hiciera por zanjas o canales, las obras de albañilería deben ser lo más sólidas posible y con una pendiente de a lo menos un cuarto de pulgada por cada cien pies de longitud...” (Vitrubio, 2000: 216).

En el siguiente párrafo, podría el autor romano haber entrado en detalles, por ejemplo cuando dice que los tubos serán a proporción del agua que va a pasar, pero es demasiado genérico: Sitúa en su diseño un depósito en la captación y otro en la entrega, y se entretiene en aclararnos el peso de los tubos de plomo según su sección, y el origen de sus nombres, relacionándolos con las planchas con las que se construyen.

“Sin autem fistulis plumbeis ducetur, primum castellum ad caput struatur, deinde ad copiam aquae lumen fistularum constituatur, eaeque fistulae e castello conlocentur ad castellum quod erit in moenibus fistulae ne minus longae pedum denum fundantur. quae si centenariae erunt, pondus habeant in singulas pondo MCC, si octogenariae pondo DCCCCLX, si quinquagenariae pondo DC, quadragenariae pondo CCCCLXXX, tricenariae pondo CCCLX, vicenariae pondo CCXL, quinum denum pondo CLXXX, denum pondo CXX, octonum pondo C, quinarie pondo LX. e latitudine autem lamnarum, quot digitos habuerint, antequam in rotundationem flectantur, magnitudinum ita nomina concipiunt fistulae.

1. The Latin text is that of the Teubner edition of 1899 by Valentin Rose.
<http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/home.html> (26-06-14)

namque quae lamna fuerit digitorum quinquaginta, cum fistula perficietur ex ea lamna, vocabitur quinquagenaria similiterque reliquae” (Vit. De arq. VIII, VI, IV).

“Si se hubiera de conducir el agua por tuberías de plomo, ante todo se hará un depósito próximo al nacimiento de la fuente, y luego, a proporción de la cantidad de agua, se determinará la luz de los tubos; desde este depósito se irán tendiendo los tubos hasta aquel otro que esté a la entrada de la ciudad. Estos tubos habrán de tener una longitud no menor de diez pies cada uno, y si fuesen “de cien”, su peso será de 1.200 libras cada uno; si fueran de ochenta, tendrían un peso de 960 libras; si de cincuenta, 600 libras; si de cuarenta, 480 libras; si de treinta, 360 libras; si de veinte, 240; si de quince, 180; si de diez, 120; si de ocho, 100 libras, y si de cinco, 60 libras. Adviértase que estos conductos toman la denominación de la anchura de las planchas, es decir, según los dedos que tenían las planchas de que estén hechos antes haber sido curvadas. Así, por ejemplo, si la plancha era de 50 dedos cuando de ella se hizo un tubo, éste se llamará de cincuenta, y así sucesivamente” (Vitrubio, 2000: 217).

2.2. Herón de Alejandría (siglo I d.c.)

El texto que contiene el párrafo que a continuación se expone procede de la traducción francesa del original².

En este párrafo, el autor griego nos informa de la manera de captar agua: de los cuidados necesarios a la hora de realizar la toma de agua, de las comprobaciones en las fluctuaciones estacionales de los caudales suministrados, del tamaño de las conducciones para que sean capaces de recoger adecuadamente todo el agua. Pero también entra en contacto con el concepto velocidad, para afirmar que es importante, puesto que determina el caudal. Además detalla un método simple para realizar las comprobaciones mediante el uso de un reloj de sol. Se trata, según *Herón*, de dejar pasar el agua a un depósito durante una hora controlada por el citado reloj y de ahí deducir el total que durante un día es capaz de suministrar la conducción analizada. De esta forma, conociendo la sección y el caudal es posible deducir la velocidad con que circula el agua.

“Une source étant donnée, évaluer son produit, c’est-à-dire la quantité d’eau qu’elle fournit.

2. Héron D’Alexandrie, “Dioptre”, Traduction française: Victor Prou. Web: <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/heron/dioptre.htm> (15-08-14)

Il faut d'abord savoir que la quantité de l'écoulement n'est pas toujours la même. En effet, dans les temps de pluie, il augmente, à cause de la surabondance de l'eau qui vient des montagnes et jaillit avec une plus grande force; il diminue, au contraire, dans les temps de sécheresse, parce qu'il n'arrive plus d'eau pour l'alimenter. Cependant, les fontaines qui sont dans de bonnes conditions sont peu susceptibles de diminuer dans leur produit. Il faut donc, après avoir circonscrit entièrement l'eau de la source de manière qu'elle ne puisse fuir d'aucun côté, fabriquer une conduite en plomb de forme quadrangulaire, en ayant soin de lui donner un volume beaucoup plus grand que celui du courant; puis l'adapter à la fontaine, de telle façon que l'eau de celle-ci soit forcée d'y entrer tout entière. Pour cela, il est nécessaire de la placer au-dessous de la source même, afin qu'elle reçoive toute la veine liquide; et la dioptra nous fournit, pour cela, le moyen de déterminer un point convenable. Prenons donc, à l'extrémité de la conduite, l'eau qui s'y engage; supposons qu'elle s'y élève à une hauteur de deux doigts, et que la largeur de l'embouchure soit de six. Multiplions 6 par 2, cela fait 12 : nous voyons ainsi que la section de la veine est de 12 doigts. Observons, toutefois, qu'il ne suffit pas, pour connaître la quantité d'eau fournie par la fontaine, de déterminer la section de la veine que nous disons être de douze doigts; il faut avoir en outre sa vitesse: car, plus l'écoulement est rapide, plus la fontaine fournira d'eau; et, plus il est lent, moins il y aura de produit. Pour ce motif, après avoir creusé un réservoir sous le courant, il faut examiner, au moyen d'un cadran solaire, combien il y entre d'eau en une heure, et de là déduire la quantité d'eau fournie en un jour; alors on n'a pas besoin de mesurer la section de la veine: la mesure seule du temps suffit pour rendre évident le produit de la source" (Herón, dioptra, XXXI).

2.3. Cayo Plinio Segundo (23-79 d.C.)

Se han utilizado para este trabajo la versión original del texto latino³ así como una de las traducciones al castellano existentes (Plinio, 2002).

El uso de tuberías de barro en lugar de las de plomo, la pendiente que es más adecuada para los canales (1/4 de pulgada cada 100 pies) o la necesidad de estable-

3. Naturalis Historia. Pliny the Elder. Karl Friedrich Theodor Mayhoff. Lipsiae. Teubner. 1906.
<http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.02.0138%3Abook%3D31%3Achapter%3D19> (24-06-14)

cer registros cada dos *actus*, son algunas de la cuestiones que expone Plinio en este párrafo, probablemente tomados de Vitrubio. Por último, afirma que habrá de ser de plomo cuando se quiere alcanzar gran altura, y que asciende a la misma altura del lugar del que procede. En este punto hay que discrepar de Plinio; la pérdida de carga hace que la altura de llegada sea siempre menor que la de salida.

“Ceterum a fonte duci fictilibus tubis utilissimum est crassitudine binum digitorum, commissuris pyxidatis ita, ut superior intret, calce viva ex oleo levigatis. libramentum aquae in centenos pedes sicilici minimum erit, si cuniculo veniet, in binos actus lumina esse debebunt. quam surgere in sublime opus fuerit, plumbo veniat. subit altitudinem exortus sui. si longiore tractu veniet, subeat crebro descendatque, ne libramenta pereant” (Plin. Nat. 31,19).

“Por lo demás lo mejor es transportar el agua desde la fuente por tuberías de barro de dos dedos de diámetro, con las juntas encajadas de forma que quede dentro la parte de arriba, y embadurnadas con cal viva suavizada con aceite. La caída mínima del agua es de un cuarto de pulgada para cada cien pies; si va subterránea, deberá haber orificios cada dos actus. Cuando es necesario que el agua proyecte un chorro muy alto, la conducción tendrá que ser de plomo. Asciende a la misma altura del lugar del que procede. Si viene de una distancia muy larga, hay que hacerla ascender y descender varias veces para que no pierda el nivel” (Plinio, 2002: 722).

En este apartado, define Plinio los diferentes calibres para las tuberías, su longitud y su peso. Todos estos datos parecen también tomados de Vitrubio.

“Fistulas denum pedum longitudinis esse legitimum est et, si quinariae erunt, sexagena pondo pendere, si octonariae, centena, si denariae, centena vicena ac deinde ad has portiones. denaria appellatur cuius laminae latitudo, antequam curvetur, digitorum x est, dimidioque eius quinaria. in anfractu omni collis quinariam fieri, ubi dometur impetus, necessarium est, item castella, prout res exiget” (Plin. Nat. 31,20).

“Lo apropiado es que las cañerías sean de una longitud de diez pies, y de un peso de sesenta libras si son quinarias, de cien libras si son de ocho, si denarias, ciento veinte, y así sucesivamente en esta proporción. Se llama tubería denaria aquella que está hecha con una lámina de plomo que mide diez dedos de ancho antes de enrollarla, y quinaria la que mide la mitad. En los recorridos accidentados es necesario poner tuberías quinarias en todos los codos, para dominar el empuje del agua; también hay que poner depósitos, según lo exija el caso” (Plinio, 2002: 722).

2.4. Sexto Julio Frontino (40-103 d.C.)

Se ha utilizado para este trabajo la versión latina⁴ contenida en la página web de Lacus Curtius, y la traducción al castellano de Tomás González Roldán (Frontino, 1985).

El autor nos introduce en el concepto de *quinaria* y sus posibles orígenes, así como su medida, de donde el autor cree que realmente proviene el término, al tratarse de un tubo de 5/4 de dedo.

“Postea modulus nec ab uncia nec ab alterutro digitorum originem accipiens inductus, ut quidam putant, ab Agrippa, ut alii, a plumbariis per Vitruvium architectum in usum urbis exclusis prioribus venit, appellatus quinariae nomine. Qui autem Agrippam auctorem faciunt, dicunt, quod quinque antiqui moduli exiles et velut puncta, quibus olim aqua cum exigua esset dividebatur, in unam fistulam coacti sint; qui Vitruvium et plumbarios, ab eo quod plumbea lammina plana quinque digitorum latitudinem habens circumacta in rotundum hunc fistulae modulum efficiat. Sed hoc incertum est, quoniam cum circumagitur, sicut interiore parte adtrahitur, ita per illam, quae foras spectat, extenditur. Maxime probabile est, quinariam dictam a diametro quinque quadrantum, quae ratio in sequentibus quoque modulis usque ad vicensariam durat, diametro per singulos adiectione singulorum quadrantum crescente: ut in senaria, quae sex quadrantes in diametro habet, et septenaria, quae septem, et deinceps simili incremento usque ad vicensariam” (Frontin. Aq. XXV).

“Inmediatamente después de un calibre que no se origina ni a partir de la pulgada ni de ninguno de los dos dedos, e introducido, según piensan algunos, por Agripa, en la opinión de otros, por los plomeros a iniciativa del arquitecto Vitrubio, llego a utilizarse en Roma con exclusión de los precedentes, bajo la denominación de quinaria (“tubo de cinco”). Quienes, pues, consideran a Agripa su inventor, declaran que se le llamó así porque los cinco antiguos calibres, delgados y como punzadas, con los que en otro tiempo se repartía el agua cuando era escasa, fueron agrupados en un solo tubo; los que atribuyen el invento a Vitrubio y a los plomeros, explican su nombre por el hecho de que una plancha lisa de plomo, de cinco dedos de anchura, curvada cilíndricamente, forma un tubo de esta medida. Pero esto es dudoso ya que, cuando se le curva, si bien en la superficie interior se achica, con todo la exterior

4. The Latin text in the Loeb edition http://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Frontinus/De_Aquis/text*.html (19-08-14)

queda ensanchada. Lo más probable es que la quinaria haya recibido su nombre de su diámetro, que es 5/4 de un dedo. Sistema que se mantiene también en los calibres siguientes hasta el vicanaria (“tubo de 20”), como por ejemplo en la senaria (“tubo de 6”) que tiene un diámetro de 6/4 de dedo y la septenaria (“tubo de 7”), con un diámetro de 7/4 y así sucesivamente con incremento semejante hasta llegar a la vicanaria (“tubo de 20”)” (Frontino, 1985: 27).

La forma en que se establecen los calibres y su relación con el caudal, o como él lo llama, *capacidad de absorción*.

“Omnis autem modulus colligitur aut diametro aut perimetro aut areae mensura, ex quibus et capacitas apparet. Differentiam unciae, digiti quadrati et digiti rotundi, et ipsius quinariae ut facilius dinoscamus, utendum est substantia quinariae, qui modulus et certissimus et maxime receptus est” (Frontin. Aq. XXVI).

“Pues bien, todo calibre se establece o por su diámetro o por su perímetro o por la medida de su sección, de cuyos principios se deja ver con claridad su capacidad de absorción (Frontino, 1985: 27).

Las dos maneras en que crece la *quinaria* son aquí definidas, bien por múltiplos de la unidad básica, bien por el incremento de las *quinarias*, aumentado el diámetro de la tubería.

“Ceterum moduli, qui a quinaria oriuntur, duobus generibus incrementum accipiunt. Est unum, cum ipsa multiplicatur, id est eodem lumine plures quinariae includuntur, in quibus secundum adiectionem quinariorum amplitudo luminis crescit. Est autem fere tum in usu, cum plures quinariae impetratae, ne rivus saepius convulneretur, una fistula excipiuntur in castellum, ex quo singuli suum modum recipiunt” (Frontin. Aq. XXVII).

“Por lo demás, son dos los principios que regulan los múltiplos que tienen como unidad básica la quinaria. Uno, cuando esta crece progresivamente, es decir, cuando en la sección misma se introducen muchas quinarias, en cuyo caso la dimensión de la apertura aumenta en proporción al número de quinarias añadido. Es el sistema regularmente empleado cuando concedidos muchos quinarios de agua, con el fin de que el canal no sea agujereado con excesiva frecuencia, se encauzan en un solo tubo a un depósito de distribución, a partir del cual cada uno recibe la cantidad que le ha sido asignada” (Frontino, 1985: 28).

“Alterum genus est, quotiens non ad quinariarum necessitatem fistula incrementum capit, sed ad diametri sui mensuram, secundum quod et nomen accipit et capacitatem ampliat: ut puta quinaria, cum adiectus est ei ad diametrum quadrans, senariam facit” (Frontin. Aq. XXVIII).

“El segundo principio se sigue siempre que el tubo se incrementa no inexorablemente según el número de quinarias, sino de acuerdo con la medida de su diámetro, y en conformidad con este sistema no solo recibe su nombre sino que amplía su capacidad; como, por ejemplo, cuando un cuarto de dedo es añadido al diámetro de una quinaria, se convierte en una senaria” (Frontino, 1985: 28).

Uno de los párrafos que más controversia ha suscitado es el que se presenta a continuación. En él, Frontino explica cómo ha tomado la medida de agua existente.

De su superficie, que traduce a *quinarios*, deduce la cantidad de agua que realmente entra por ese acueducto. Estos datos de superficie son los que todos los investigadores han tomado como referencia, a la hora de realizar su cálculos o, en algunos casos, para afirmar que la *quinaria* no es una unidad de volumen.

“Appiae in commentariis adscriptus est modus quinariarum octingentarum quadraginta unius. Cuius aquae ad caput inveniri mensura non potuit, quoniam ex duobus rivis constat. Ad Gemellos tamen, qui locus est infra Spem Veterem, ubi iungitur cum ramo Augustae, inveni altitudinem aquae pedum quinque, latitudinem pedis unius dodrantis; fiunt areae pedes octo dodrans, centenariae viginti duae et quadragenaria, quae efficiunt quinarias mille octingentas viginti quinque; amplius quam commentarii habent quinariis nongentis octoginta quattuor” (Frontin. Aq. LXVI).

“En los registros se asignó al agua Apia una cantidad de 841 quinarios. La medida de este acueducto no ha podido ser verificada en el orificio de entrada, puesto que se compone de dos canales. Sin embargo, junto a los Gemelos, lugar situado por debajo de la Vieja Esperanza, en donde se une con el ramal de la Augusta, descubrí una profundidad de agua de 5 pies y una anchura de 1 pie $\frac{3}{4}$: esto hace una superficie de 8 pies $\frac{3}{4}$, es decir 22 centenariae y una quadragenaria, lo que supone 1.825 quinarios; hay realmente 984 quinarios más que en los registros” (Frontino, 1985: 40).

CAPÍTULO 3

LAS FUENTES SECUNDARIAS

3.1. Baron de Prony (Gaspard Riche)

Gaspard Clair François Marie Riche de Prony fue un matemático e ingeniero francés, que dedicó su esfuerzos al conocimiento de la hidráulica. Nació en Chamelet (Francia) el 22 de julio de 1755 y falleció el 29 de julio de 1839. Entre sus numerosas obras, la que aquí nos ocupa fue presentada en la Real Academia Francesa de las Ciencias el 3 de Diciembre de 1816 (De Prony, 1816).

Para el desarrollo de su método de cálculo del valor de la *quinaria*, y tras una introducción en la que transcribe la traducción francesa del texto de Frontino, el Barón de Prony resume los datos extraídos, convirtiéndolos a unidades del sistema métrico, así como los datos de diámetro, perímetro y área que quedan reflejados para cada una de las secciones aportadas por el autor romano:

“J’ai suivi dans le classement des modules, l’ordre indiqué par Frontinus, mais cet ordre n’est pas le plus conforme à l’analogie des mesures entre elles. Ces mesures ne forment réellement que deux divisions générales, l’une composée des modules donnés par le diamètre, et l’autre des modules donnés par l’aire de l’orifice. La première division présente deux sous-divisions, l’une desquelles est occupée par l’uncia seule, et l’autre par les modules dont les diamètres forment une série régulière et croissante de quart en quart de doigt, à la tête de laquelle se trouve le digitus rotundus. La seconde division générale doit se composer de tous les modules compris dans la troisième division du tableau ci-dessus, plus le digitus quadratus in rotundum redactus qui en est le plus petit terme” (De Prony, 1816: 452).

Tal y como queda expresado en la tabla que acompaña al texto y que a continuación transcribimos:

TABLEAU DU SYSTÈME DES MESURES ROMAINES													
APPLICABLES A LA DISTRIBUTION DES EAUX.													
Nota. L'expression surface en quinaires désigne le nombre de fois que l'aire d'un orifice contient l'aire d'un cercle dont le diamètre = $\frac{1}{2}$ de doigt. Les lettres initiales n. u. indiquent les modules qui n'étaient pas en usage au temps de Frontinus.													
CLASSEMENT ET NOMS DES MODULES.	DIMENSIONS DES ORIFICES EN NOMBRES FRACTIONNAIRES DUODÉCIMAUX, d'après les sous-divisions romaines de l'as.									DIMENSIONS DES ORIFICES EN NOMBRES FRACTIONNAIRES DÉCIMAUX.			
	DIAMÈTRE.			CIRCONFÉRENCE.			SURFACE EN QUINAIRES.			DIAMÈTRE	CIRCONFÉ- RENCE.	SURFACE EN QUINAIRES	
	Doigt.	Onces ou $\frac{1}{12}$ de doigt.	Serpulles ou $\frac{1}{24}$ d'once.	Doigt.	Onces ou $\frac{1}{12}$ de doigt.	Serpulles ou $\frac{1}{24}$ d'once.	Quinaires.	Onces ou $\frac{1}{12}$ de quinaire.	Serpulles ou $\frac{1}{24}$ d'once.				
1 ^{re} DIVISION.	Uncia	1	4	0	4	2	6	1	1	153	1,33333	4,18878	1,13773
	Digitus quadratus in rotundum reductus	1	1	13	3	6	13	0	9	18	1,12847	3,54519	0,81250
	Digitus rotundus	1	0	0	3	1	17	0	7	16	1,00000	3,14159	0,64000
	Fistula quinaria	1	3	0	3	11	3	1	0	0	1,25000	3,92708	1,00000
	Fistula senaria	1	6	0	4	8	13	1	5	6	1,50000	4,71181	1,43750
	septenaria, n. u.	1	9	0	5	6	0	1	11	12	1,75000	5,50000	1,95833
	octonaria	2	0	0	6	3	8	2	6	18	2,00000	6,27778	2,56250
	denaria	2	6	0	7	10	6	4	0	0	2,50000	7,85417	4,00000
	duodenaria, n. u.	3	0	0	9	5	2	5	9	0	3,00000	9,48611	5,75000
	apud aquarios	3	0	18	9	7	11	6	0	0	3,08250	9,62113	6,00000
2 ^e DIVISION.	quinumdenum	3	9	0	11	9	8	9	0	0	3,75000	11,77778	9,00000
	vicenaria	5	0	0	15	8	12	16	0	0	5,00000	15,70833	16,00000
	apud aquarios	4	6	0	14	1	15	12	11	10	4,50000	14,13717	12,95883
	Aire de l'orifice } fistula vicenum 25 doigts carrés. } quinum	5	7	17	17	8	18	20	4	12	5,64236	17,72917	20,37500
	30 doigts carrés, fistula tricenaria	6	2	4	19	5	0	24	5	8	6,18056	19,41667	24,44444
	35, n. u.	6	8	3	20	11	18	28	6	6	6,67708	20,97917	28,52083
	40	7	1	16	22	5	0	32	7	4	7,13389	22,41667	32,59722
	45, n. u.	7	6	20	23	9	8	36	8	0	7,56944	23,77778	36,66667
	50	7	11	18	25	0	18	40	9	0	7,97917	25,06250	40,75000
	55, n. u.	8	4	10	26	3	12	44	9	20	8,36806	26,29167	44,81944
3 ^e DIVISION.	60	8	8	21	27	5	12	48	10	16	8,73958	27,45833	48,88889
	65, n. u.	9	1	4	28	8	22	52	11	12	9,14422	28,57639	52,95833
	70	9	5	8	29	8	0	57	0	12	9,44444	29,66667	57,04167
	75, n. u.	9	9	6	30	8	8	61	1	8	9,77083	30,69445	61,11111
	80	10	1	2	31	8	8	65	2	6	10,09028	31,69445	65,18750
	85, n. u.	10	4	20	32	8	4	69	3	4	10,40278	32,68056	69,26389
	90	10	8	11	33	7	14	73	4	0	10,70486	33,63194	73,33333
	95, n. u.	11	0	0	34	6	16	77	5	0	11,00000	34,55556	77,41667
	100	11	3	10	35	5	10	81	5	20	11,28472	35,45139	81,48611
	113	11	11	22	37	8	3	92	0	14	11,99306	37,67744	92,04861
4 ^e DIVISION.	120	12	4	8	38	10	0	97	9	10	12,36111	38,83333	97,78472
	200	15	11	20	50	2	2	163	6	16	15,98611	50,22180	163,55556

Tabla 1. Resumen de los datos extraídos por Prony (De Prony, 1816: 451)

La quinaria de Frontino. Un estado de la cuestión

El autor establece dos fórmulas con las que calcular los caudales en función del diámetro o la superficie:

Para el diámetro:

$$Q = 0,64 \times D^2$$

Donde:

Q es el caudal

D el diámetro de la sección propuesta

Para la sección:

$$Q = 0,64 \times (A/A')$$

Donde:

Q es el caudal

A es la sección de una conducción cualquiera

A' es la sección de una conducción de diámetro 1

“Si on veut connaître le degré d’exactitude des nombres de Frontinus, on aura en désignant par A l’aire du cercle dont le diamètre = 1, par A l’aire de l’orifice d’un module quelconque, par D le diamètre de cet orifice, (A exprimant des doigts quarrés et D des doigts linéaires) et par Q le nombre de quinaires que ce module fournirait si les produits étaient proportionnels aux aires des orifices, ainsi que le suppose Frontinus.

$$Q = 0,64 D^2 \qquad \log 0,64/A' = 19,110901$$

$$Q = 0,64 A/A' \qquad 0,64/A' = 0,814873$$

La première formule servira pour les modules qui sont donnés par le diamètre, et la seconde pour ceux qui sont donnés par l’aire de l’orifice.

La connaissance que nous avons des produits absolus du module d’eau français du pouce de fontainier, des grandes et petites onces d’eau romaines modernes, donne immédiatement les rapports entre ces divers produits; d’une autre part, si j’ai bien conjecturé en supposant que les anciens Romains avaient, comme les modernes, la charge d’eau, sur le centre de l’orifice, égale à la longueur de l’ajutage, je puis conclure, de cette hypothèse, les valeurs approchées de leurs differens modules; je vais, en partant des déterminations consignées dans le Mémoire, donner les produits absolus en vingtquatre heures, et les rapports du double module d’eau français, du pouce de fontainier, des grandes et petites

onces d'eau romaines modernes, et des modules antiques désignés par les noms uncia, digitus cjuadratus, digitus rotundus, quinaria :..." (De Prony, 1816: 452-453).

El resultado final en forma de caudales para 24 horas, junto con los logaritmos en base 10 de esos valores, los refleja tabulados:

	PRODUITS EN 24 HEURES.	LOGARITHMES.
	Mètres cubes.	
Double module d'eau français.....	20,00.....	1,3010300.
Pouce de fontainier.....	19,19527..	1,2831943.
Grande once d'eau romaine moderne....	41,16.....	1,6144754.
Petite once d'eau <i>idem</i>	20,58.....	1,3134454.
Uncia (<i>antique</i>).....	63,711....	1,8042158.
Digitus quadratus.....	45,6329...	1,6592781.
Digitus rotundus.....	35,84.....	1,5543680.
Quinaria.....	56.....	1,7481880.

Tabla 2. Resumen de caudales y sus correspondientes logaritmos (De Prony, 1816: 453)

Una tabla ampliada, con datos calculados por el autor del trabajo, puede verse a continuación; en ella es posible observar el valor dado para la *quinaria* en metro cúbico por día y la velocidad, establecido por Prony para cualquier sección.

También la aplicación de la dos fórmulas propuestas por el ingeniero francés para el cálculo de caudales, bien por diámetro, bien por superficie:

El hecho de que, por encargo de Napoleón, el Barón de Prony confeccionara las tablas logarítmicas, además de las trigonométricas, parece haber influido en su trabajo. Como podemos observar, utiliza el logaritmo en base diez de los valores de caudal que calcula, aunque queda sin determinar el uso que pudo hacer de estos datos.

Como aclaración hay que indicar que el logaritmo de un número en una base determinada se calcula viendo cuál es el exponente a que hay que elevar la base para obtener ese número o, dicho de otro modo, si el logaritmo en base a de X es n , entonces X es igual a a elevado a n .

Por tanto, y aunque aparecen, como decíamos, los datos referidos al cálculo logarítmico en base diez, no se ofrece ninguna explicación que permita establecer una relación entre el caudal y esos cálculos.

3.2. J. B. Rondelet

Jean-Baptiste Rondelet nació en Lyon en 1743 y murió en París en 1829. Se trata de un arquitecto francés, autor de un conocido tratado teórico práctico sobre el arte de edificar, aunque también compuso trabajos relacionados con Frontino y los acueductos de Roma (Rondelet, 1820). Estos últimos son los que han servido de base para este trabajo.

Rondelet inicia su trabajo con una definición del término *quinaria*:

Du Quinaire.

“Le quinaire était un module ou tuyau de bronze, dont le diamètre était de cinq quarts de doigt. Ce module servait d’unité de mesure pour la distribution des eaux des aqueducs de Rome, du temps de Frontin: comme le tuyau de jauge appelé pouce-d’eau sert pour les eaux de Paris, et actuellement Fonce d’eau pour celles de Rome” (Rondelet, 1820: xvii).

Para sus cálculos, el autor basa su razonamiento en los datos extraídos de Frontino, confirmando que el valor de un tubo *quinario* corresponde a 1 más $51/224$ dedos:

“Le diamètre de l’orifice du tuyau quinaire étant d’un doigt et un quart, son périmètre sera $3 + 13/14$, et sa superficie: $1 + 51/224$ ou 1,227.

Cette évaluation du quinaire se trouve confirmée par le calcul que Frontin donne, art. LXV de la section d’eau prise dans le canal de l’aqueduc de l’Appia, au-dessus du réservoir des Gamelles, endechà du temple de la Vieille-Espérance. Il trouva que cette section avait un pied $5/4$ ou 28 doigts de largeur, sur 5 pieds de hauteur ou 80 doigts, produisant une superficie de 2240 doigts carrés, qu’il évalue à 1825 quinaires: or, divisant 2240 par 1825, on trouve 1 doigt $51/224$ pour la valeur de la superficie du tuyau quinaire, comme nous l’avons ci-devant évalué” (Rondelet, 1820: xx).

Posteriormente el autor se enfrasca en una comparación, que le servirá de apoyo para sus reflexiones, con el agua que llega a París y a Roma en la época en que escribe, y de ahí deduce un valor estimado para la *quinaria*.

TABLEAU DU SYSTEME DES MESURES ROMAINES APPLICABLES A LA DISTRIBUTION DE EAUX

[illegible]

Tabla 3. Ampliada (columnas en fondo azul) sobre la realizada por Prony por el autor de este estudio.

“Le pousse-d’eau, qui sert de mesur por les eaux à Paris, est un orifice de 27 millimètres de diamètre, dont la superficie est de 573 millimètres; d’où il résulte que le rapport de l’orifice du quinaire est à celui du pousse-d’eau, comme 423 est à 573; en sorte qu’à vîtesse égale, 573 quinaires fourniraient 423 pouses d’eau” (Rondelet, 1820: xx-xxi).

Continúa con una descripción histórica, que le conduce a especular sobre la forma en que se podía realizar la medida de caudal. Para ello aplica los métodos empleados por el arquitecto del Papa Pablo V, Charles Fontana, recuperando los datos que contiene el tratado de las aguas que este redactó en 1696, asimilando esta forma de medir a lo realizado por Frontino:

“Ce n’est que depuis environ un siècle qu’on est parvenu à évaluer avec plus de précision le produit des tuyaux de jauge. Ce moyen n’était pas encore connu, de Charles Fontana, architecte chargé de la direction des eaux de Rome, sous le pontificat de Paul V; puisque dans son Traité des eaux courantes imprimé à Rome en 1696, il propose pour trouver le nombre d’onces d’eau que fournit le canal d’un aqueduc, de placer à la tête ou sur le côté, une espèce d’encais sement portant une vanne mobile ajustée dans des rainures, et placée de manière que le haut de l’ouverture se trouve à 15 onces au-dessous de la superficie de l’eau du canal, ainsi qu’on le voit indiqué par les figures 1, 2, 3 et 4 de la planche XII” (Rondelet, 1820: xxiv).

Todo ello lo lleva a concluir con un error de concepto, difícil de entender en un arquitecto. Al dividir lo que considera la superficie, es decir 1.825, por la anchura, 28 dedos, obtiene lo que afirma ser la altura del agua elegida para colocar la válvula de paso. El error es evidente, 1.825 no es la superficie sino los quinaros, la superficie, él mismo la ha dado con anterioridad, es 2.240 dedos cuadrados. Siguiendo su extraño razonamiento, concluye que la quinaria tendría un valor de algo más de 1,5 pies cúbicos.

“Ce qui paraît confirmer cette hypothèse, c’est que si l’on divise la surface 1825, qui exprime en doigts carrés le nombre de quinaires évalués par Frontino, par la largeur du canal qui était de 28 doigts, on trouvera que la hauteur de l’ouverture devait être de 65 doigts; et comme la hauteur totale de l’eau était de 80 doigts, il en résulte que la charge ou hauteur de l’eau retenue par la vanne du pertuis de jauge, devait être de 15 doigts, répondant à 15 onces du palme romain. Ainsi la charge de l’once d’eau actuelle étant la même que celle du quinaire, leur produit devait être comme le carré de leur diamètre, c’est-à-dire comme 16 est à 25, qui donne un peu plus de 1 pied 1/2 cube. Mais, comme le pertuis de

jauge de Frontino était placé à environ 7 milles de Rome, cette quantité pouvait être réduite, à son arrivée à Rome, à 1 pied 1/2 cube” (Rondelet, 1820: xxv-xxvi).

El autor acompaña el texto con unas tablas resumen, de las que incluimos una, que se ha completado con algunos datos más, los cuales se deducen de sus cálculos:

NOMS DES MODULES.	DIAMÈTRES			CAPACITÉ			PRODUIT POUR 24 HEURES,	
	en doigts.	en pouces et millimètres.	en millimètres.	en quinaires et millimètres.	en pouces - d'eau et millimètres.	en pouces - d'eau et millimètres.	en muds de 8 pieds cub et millimètres.	en mètres cubes et millimètres.
Tuyau quinaire.....	1,250	0,852	23	1,000	1,384	3,000	216,000	60,000
sextaire.....	1,500	1,037	28	1,368	1,894	4,104	295,488	82,080
septénaire.....	1,750	1,222	33	1,961	2,715	5,883	423,576	117,660
octonaire.....	2,000	1,370	37	2,561	3,546	7,683	553,176	153,660
dénaire.....	2,500	1,704	46	4,000	5,538	12,000	864,000	240,000
duodénaire.....	3,000	2,074	56	5,760	7,975	17,280	1244,160	345,600
quinzénaire.....	3,750	2,592	70	9,000	12,461	27,000	1944,000	540,000
vingténaire.....	5,000	3,444	93	16,000	22,154	48,000	3456,000	960,000
Module de 25 doigts carrés..	5,640	3,888	105	20,375	28,211	61,125	4401,000	1222,500
de 30 id.....	6,180	4,259	115	24,450	33,854	73,350	5281,200	1467,000
de 35 id.....	6,674	4,592	124	28,524	39,495	85,572	6161,184	1711,440
de 40 id.....	7,134	4,888	132	32,599	45,137	97,797	7041,384	1955,940
de 45 id.....	7,542	5,185	140	36,674	50,779	110,022	7921,584	2200,440
de 50 id.....	7,982	5,481	148	40,416	55,961	121,248	8729,856	2424,960
de 55 id.....	8,366	5,741	155	44,825	62,065	134,475	9682,200	2689,500
de 60 id.....	8,740	6,000	162	48,908	67,719	146,724	10564,128	2934,480
de 65 id.....	9,096	6,259	169	52,975	73,350	158,925	11442,600	3178,500
de 70 id.....	9,440	6,481	175	57,049	78,991	171,147	12322,584	3422,940
de 75 id.....	9,770	6,704	181	61,124	84,633	183,372	13202,784	3667,440
de 80 id.....	10,090	6,926	187	65,199	90,275	195,597	14082,984	3911,940
de 85 id.....	10,400	7,148	193	69,274	95,918	207,824	14963,128	4156,480
de 90 id.....	10,702	7,370	199	73,349	101,560	220,047	15843,384	4400,940
de 95 id.....	11,098	7,555	204	77,440	107,225	232,320	16727,040	4646,400
de 100 id.....	10,282	7,741	209	81,499	112,844	244,497	17603,784	4889,940
de 120 id.....	12,358	8,629	233	97,799	135,414	293,397	21124,584	5867,940

Tabla 4. Resumen de cálculo (Rondelet, 1820: xxvii).

La *quinaria* de Frontino. Un estado de la cuestión

NOMS DES MODULES	DIAMÈTRES			CAPACITÉ			PRODUIT POUR 24 HEURES		CÁLCULOS DEL AUTOR DEL ESTUDIO		
	en doigts	en ..	en millimetres	en quinarias et en millimetres	en onces- d'eau et millièmes	en ponces-d'eau et millièmes	en ----ida de 5 piede cub. ft millièmes	en mètres cubics et millièmes	area	m³/s	velocidad
Tuyau quinaire	1,250	0,852	23	1,0000	1,3840	3,0000	216,0000	60,0000	0,0004	0,0007	1,6714
sextaire	1,500	1,037	28	1,3680	1,8940	4,1040	295,4880	82,0800	0,0006	0,0010	1,5428
septenaire	1,750	1,222	33	1,9610	2,7150	5,8830	423,5760	117,6600	0,0009	0,0014	1,5922
octonaire	2,000	1,370	37	2,5610	3,5460	7,6830	553,1760	153,6600	0,0011	0,0018	1,6541
dénnaire	2,500	1,704	46	4,0000	5,5380	12,0000	864,0000	240,0000	0,0017	0,0028	1,6714
duodénaire	3,000	2,074	56	5,7600	7,9750	17,2800	1,244,1600	345,6000	0,0025	0,0040	1,6240
quinzenaire	3,750	2,592	70	9,0000	12,4610	27,0000	1,944,0000	540,0000	0,0038	0,0063	1,6240
vingténnaire	5,000	3,444	93	16,0000	22,1540	48,0000	3,456,0000	960,0000	0,0068	0,0111	1,6357
Module de 25 doigts carrés	5,640	3,888	105	20,3750	28,2110	61,1250	4,401,0000	1,222,5000	0,0087	0,0141	1,6341
de 30	6,180	4,259	115	24,4500	33,8540	73,3500	5,281,2000	1,467,0000	0,0104	0,0170	1,6347
de 35	6,674	4,592	124	28,5240	39,4950	85,5720	6,161,1840	1,711,4400	0,0121	0,0198	1,6403
de 40	7,134	4,888	132	32,5990	45,1370	97,7970	7,041,3840	1,955,9400	0,0137	0,0226	1,6543
de 45	7,542	5,185	140	36,6740	50,7790	110,0220	7,921,5840	2,200,4400	0,0154	0,0255	1,6544
de 50	7,982	5,481	148	40,4160	55,9610	121,2480	8,729,8560	2,424,9600	0,0172	0,0281	1,6315
de 55	8,366	5,741	155	44,8250	62,0650	134,4750	9,682,2000	2,689,5000	0,0189	0,0311	1,6497
de 60	8,740	6,000	162	48,9080	67,7190	146,7240	10,564,1280	2,934,4800	0,0206	0,0340	1,6478
de 65	9,096	6,259	169	52,9750	73,3500	158,9250	11,442,6000	3,179,5000	0,0224	0,0368	1,6405
de 70	9,440	6,481	175	57,0490	78,9910	171,1470	12,322,5840	3,422,9400	0,0241	0,0396	1,6471
de 75	9,770	6,704	181	61,1240	84,6330	183,3730	13,202,7840	3,667,4400	0,0257	0,0424	1,6497
de 80	10,090	6,926	187	65,1990	90,2750	195,5970	14,082,9840	3,911,9400	0,0275	0,0453	1,6486
de 85	10,400	7,148	193	69,2740	95,9180	207,8240	14,963,3840	4,156,4800	0,0293	0,0481	1,6444
de 90	10,702	7,370	199	73,2740	101,5600	220,0470	15,843,3840	4,400,9400	0,0311	0,0509	1,6377
de 95	11,998	7,555	204	77,4400	107,2250	232,3200	16,727,0400	4,646,4000	0,0327	0,0538	1,6453
de 100	10,282	7,741	209	81,4990	112,8440	244,4970	17,603,7840	4,889,9400	0,0343	0,0566	1,6497
de 120	12,358	8,629	233	97,7990	135,4140	293,3970	21,124,5840	5,485,9400	0,0426	0,0679	1,5928

Tabla 5. Elaborada por el autor del trabajo sobre la Tabla 4, ampliada.

Las celdas en azul no pertenecen a la tabla original; han sido añadidas por el autor del estudio. En negrita el valor de una *quinaria*.

Para la velocidad media, se obtiene un resultado de 1,6367 m/s. El valor establecido por Rondelet para la *quinaria* es de 60 m³/24h, lo que equivale a 0,6944 l/s.

Los razonamientos utilizados por Rondelet para el cálculo de la *quinaria*, no se apoyan en ningún aparato matemático; son consecuencia de una serie de disquisiciones y deducciones, en muchos casos gratuitas, que el autor va encajando hasta obtener una conclusión. Independientemente del valor obtenido, ya sea este correcto o no, la base científica en que se apoya es, como mínimo, cuestionable, amén de los importantes errores que comete a la hora de traducir a números sus ideas.

No obstante, hay que reseñar que es uno de los primeros autores que se enfrenta a la cuestión, y lo hace apoyándose en sus conocimientos más próximos, los referidos al abastecimiento de agua a París y Roma en su época. Por tanto, la validez de su aportación se basa en la capacidad para detectar el problema y evaluarlo hasta obtener un resultado, más allá de que no sea posible aceptar sus razonamientos.

3.3. Anónimo

Sobre este texto es curioso resaltar que, por autores, no cuenta más que una genérica “*Ricondota da una Società Romana*”, y un sello que nos recuerda que está almacenado en la biblioteca de ingeniería de Roma (Anónimo, 1870).

Su contenido trata, tal y como anuncia el título, sobre diversos aspectos del acueducto *Antica Marcia*, y por lo que se refiere a este trabajo, es en su capítulo 3, *Sulla portata d’acqua deglo antichi acquedotti e considerazione sulla quinaria*, en el que nos vamos a centrar (Anónimo, 1870).

Los anónimos autores basan sus cálculos en lo indicado por Frontino, en sus propias mediciones de altura de las incrustaciones calcáreas del canal, realizadas directamente en varios tramos del acueducto objeto de estudio y en la pendiente:

“Se troppo avari ci furono gli antichi in darci nozioni più esatte su questa materia, non ci fu d’altra parte sì nemico il tempo di non riservarci sufficienti avanzi di condotture dai quali poter dedurre un più accurato valore della quinaria valendoci pure delle notizie lasciateci dallo stesso Frontino. Si è ritrovato, come dicemmo, parte del l’acquedotto marcio antico in vari punti, e specialmente nelle vicinanze della sorgente. Questi avanzi

sono bastantemente conservati per poterne misurare con esattezza e lo speco e la pendenza del l'acquedotto. Il perimetro bagnato dell' acqua che finiva pel condotto, si rileva con sufficiente precisione dall' altezza del l'incrostazione, che v'è ancor sensibilissima e la quale prova pure come con l'andar degli anni l'acqua scemasse di livello; poichè distinguonsi generalmente tre grossezze di tartaro sul cocchiopesto dell'acquedotto; l'uno, il più fino, ha la ertezza d'un foglio di carta e giunge fino ad un metro sopra la platea del l'acquedotto; il secondo finisce a 60 cent., il terzo, ch'è assai più forte, non oltrepassa i 28 o 30 centimetri. Con siffatti elementi alla mano supponiamo per poco che a tempo di Frontino l'acquedotto fosse in perfetto stato e che l'acqua giungesse al massimo dell' altezza indi cata dall'incrostazione, a un metro, cioè; avvertendo inoltre che la platea, benchè seguisse la generale pendenza in metri 0,46 per 800 metri di lunghezza, era tuttavia assai irregolare, avremmo che la nota formola di Darcy" (Anónimo, 1870: 127-128).

$$V= 63,25 \times \text{SQR}((L \times H)/(L+2H)) \times I$$

Donde

V= velocidad del agua

L= ancho del canal (1,50 m)

H= altura del agua (1,00 m)

I= pendiente (0,46 m de desnivel en 800 m de longitud)

Con estos datos deducen una velocidad de 0,987 m/s. redondeando a 1 m/s, y con un área de agua de 1,50 m², llegan a la conclusión de que el canal transportaba 1,50 m³/s, lo que da un total a máxima carga de 129.600 m³/día. Según Frontino el agua transportada en *quinarias* es 4.690, por lo que de su división se puede deducir el valor de la *quinaria*: 27,216 m³/día.

Aunque de la aplicación de la fórmula utilizada en el texto no se deriva el valor exacto que los autores indican:

$$V= 63,25 \times \text{SQR}((L \times H)/(L+2H)) \times I = 0,9929 \text{ m/s}$$

Pero, dado que los propios autores redondean el cálculo a 1 m/s, este error no produce ninguna distorsión en sus razonamientos.

Posteriormente realiza una estimación basándose en los datos de Frontino para el agua *Apia*, en el que el autor romano habla de 1825 *quinarias* para una sección, en medidas actuales de 1,48 m de ancho y 0,57 m de alto de lo que se deduce la superficie de la lámina de agua, 0,7696 m².

“Un’altro argomento che riputiamo convincentissimo a fissare il suindicato va lore all’antica quinary, può trarsi da quanto lo stesso Frontino ci disse rapporto alla sua misura fatta nell’acquedotto Appio. Come dicemmo egli (65 loc. cit.) dedusse il numero delle 1825 quinary dell’acquedotto Appio dal rapporto della sua superficie con quello del l’unità. Or bene riferiamo ora alla quinary tanto quella velocità che ne deducemmo poco fa, quanto quella ammessa dal Rondelet, e Vediamone il risultato. Al dir di Frontino, la larghezza dello speco era 5 piedi l’altezza bagnata $1 \frac{3}{4}$: numero delle quinary 1825; riducendo all’odierno sistema metrico questi dati, trovasi la superficie

$$S = 1,48m \times 0,52m = 0,7696 m^2.$$

Secondo Rondelet e Cavalieri la quantità d’acqua Q sarebbe di metri cubici 1,334. Laonde supponendo quanto ammisero essi la velocità

$$V = Q/S = 1,334/0,7696 = 1,73$$

D’altra parte stando al valore da noi trovato per la quinary si ha invece

$$V = 0,5748/0,7696 = 0,74$$

Che se riflettasi ora alla diversità notabilissima di questi risultati e nel tempo istesso all’industria usata da Frontino di evitare cioè nelle misurare d’acqua e la troppa rapidità e l’eccessiva lentezza di questa, sarà a conchiudersi più prossima al vero la velocità di 0,74 per minuto secondo, che l’altra di 1 m. 73.

Nè crediamo quindi di andare errati se alle acque fluenti entro le antiche condotture romane assegniamo in media la velocità di 0,74 a 1,” la quale corrisponde a quella dell’uomo che cammina con moto ordinario; e ciò tanto più in quanto che ammessa la velocità di 1 m. 73 non si saprebbe comprendere come i migliori acquedotti antichi avrebbero potuto resistere all’urto dell’acqua principalmente nelle sinuosità.

Laonde si può a buona ragione ammettere che il valore dell’antica quinary corrispondesse all’incirca a 0 lit. 315 per 1.” Quindi ne conseguita che il totale delle 24,805 quinary che finivano a Roma sotto Nerva e Traiano equivalevano a metri cubici 675.092 in 24 ore, anzi che alla somma favolosa di 1.567,179 che stimarono Rondelet e Cavalieri” (Anónimo, 1870: 129-131).

Compara los resultados obtenidos por Rondelet (Vid. supra 4.2) con los propios:

$$V= Q/S$$

Donde:

V= velocidad en m/s

Q= caudal en m³

S= sección en m²

Con los datos de Rondelet, el caudal es de 1,334 m³/s, con lo que la velocidad es de 1,73 m/s, en tanto que con sus datos el caudal es de 0,5796 m³/s, para los que se obtiene una velocidad de 0,74 m/s.

Como conclusión, afirma el valor de velocidad para Rondelet es demasiado alto, en tanto que el calculado por ellos mismos está más próximo a la realidad, y cita como ejemplo la velocidad de un hombre andando, que alcanzaría entre 0,74 y 1 m/s.

Y por último compara los datos totales de suministro a la ciudad de Roma, que para Rondelet sería de 1.567.179 m³/día en tanto que para ellos sería de 675.092 m³/día. Los primeros estarían, según los autores, muy alejados de la realidad.

En este caso, la referencia que utiliza este trabajo, como elemento de contraste, es la de J.B. Rondelet, dando por incorrectos sus datos y aportando una visión distinta del problema.

3.4. Rodolfo Lanciani

Arqueólogo, ingeniero y topógrafo italiano (1845-1929), se especializó en trabajos relacionados con la antigua Roma. Entre sus obras destaca *Storia degli Scavi di Roma e le Notizie intorno alle Collezioni Romane di Antichità*, publicada en cuatro tomos entre 1902 y 1912 y, asimismo, la que aquí nos ocupa (Lanciani, 1850).

Lanciani hace un breve recorrido de los datos y cálculos de Rondelet (*Vid. supra* 4.2) y del Anónimo (*Vid. supra* 4.3), y repite su formulación, analizando los métodos empleados y los resultados obtenidos.

“I calcoli del Rondelet e del Cavalieri sono esatti per ciò che spetta alla superficie del vecchio e del nuovo modulo; essendo legge geometrica che le capacità di due tubi in condizioni identiche stieno nel rapporto del quadrato dei diametri. Ma siamo poi sicuri che la velocità d’efflusso, che il battente fosse uguale o quasi? L’autore dell’opuscolo, Brevi notizie sull’acqua pia p. 126 sg. Nega questa uguaglianza: nega la relazione

16:25. *L'argomento che egli propone é degno di essere preso in considerazione da chi si intende di questo studi*" (Lanciani, 1850: 361).

Para este autor, el trabajo anónimo resulta mucho más razonable. No obstante, recomienda la realización de un estudio por un equipo de ingenieros, tomando datos en diferentes puntos, en varios acueductos.

"Le argomentazioni dell'autore dell'opuscolo mi sembrano assai efficaci. Prima però di ammetterne pienamente i risultati, sarebbe necessario eseguire altre sperienze in altri aquedotti, ed in condizioni diversissime. Dato il caso, per esempio, che a valle del sito dove l'autore misurò l'alveo della marcia, questo formasse una caduta, la velocità sarebbe assai più forte di quella data dalla fomrmola di Darcy. Un istituto di ingegneri, che promovesse queste ricerche, farebbe cosa assai utile e per la teoríe e per la pratica" (Lanciani, 1850: 362).

En última instancia, Lanciani no toma como definitivos ninguno de los cálculos que enumera en su obra, pues considera que la cuestión está demasiado abierta como para aceptar uno u otro, aunque inicialmente considera que los resultados de Rondelet son demasiado elevados como para ser correctos.

4.5. Eugène Belgrand

Ingeniero francés, nació en 1810 y murió en 1878. Tuvo un importante papel en la modernización de los sistemas de suministro de agua y saneamiento de la ciudad de París. El texto que recoge sus trabajos incluye una introducción en la que hace un análisis del abastecimiento a la ciudad de Roma, a través de lo indicado por Frontino (Belgrand, 1875).

Apoyándose en un razonamiento basado en las explicaciones dadas por el autor romano, el ingeniero francés realiza una primera aproximación bajo la suposición de qué ocurriría si el punto de suministro estuviera cerca o lejos del punto de consumo, lo que le lleva a la conclusión de que habría grandes diferencias en los volúmenes aportados en cada caso.

"Je me bornerai donc à donner une idée du degré de régularisation qu'on obtenait, en faisant connaître le produit du quinaire dans diverses hypothèses.

Supposons qu'il n'y ait eu aucune règle: un riche patricien aurait facilement obtenu, par son influence, que le château d'eau fût placé à côté de son domaine, à 20 mètres par exemple, et à la plus grande hauteur volumen, soit à 7 mètres au-dessus de l'orifice de sortie; évidemment,

il aurait adapté, à l'extrémité du calice d'un quinaire (0,0232 m), une conduite d'un diamètre beaucoup plus grand, soit un quinzenaire (0,0695 m), et, grâce à ces dispositions, il aurait reçu chez lui un volumen d'eau de plus de 1000 mètres cubes par 24 heures, environ 17 fois le débit attribué au quinaire par Rondelet.

Prenons un autre concessionnaire moins riche, moins influent, se trouvant placé, par la mauvaise chance du hasard, à une assez grande distance du château d'eau, à 200 mètres par exemple, et seulement à 2 mètres au-dessous: obligé, par économie, de maintenir le diamètre du quinaire sur toute la longueur de la conduite, il n'aurait reçu, par 24 heures, que 3 mètres cubes d'eau" (Belgrand, 1875: 88).

Para este autor resulta fácilmente comprensible que, dadas las características del sistema de abastecimiento a la ciudad de Roma, el fraude fuera algo más que frecuente, y aunque Frontino actuó con dureza para tratar de evitarlo, supone que tras su paso como *curator*, volvería a producirse de manera sistemática.

"Les conduites de distribution étaient criblées de trous appelés points, qui étaient forés par un des fontainiers, désignés sous le nom de a punctis. L'eau qui s'écoulait par un trou était vendue frauduleusement aux riverains.

C'était surtout sur les conduites des fontaines publiques et des pièces d'eau que cette industrie s'exerçait: elles étaient criblées de points, et il arrivait peu d'eau à destination; les concessionnaires n'auraient sans doute pas toléré de semblables abus.

Frontin, par sa vigilance, sut les réprimer pour la plupart. Il recommande à ses collaborateurs de marquer (signare) soigneusement les calices et les 50 premiers pieds des conduites; mais il est bien clair qu'après lui comme avant, les abus ont dû se développer; sur une échelle d'autant plus grande qu'ils étaient inhérents au mode même de distribution. Tout cela prouve qu'il devait y avoir de grandes lacunes dans l'organisation de l'administration des eaux de Rome.

Il ne faut pas croire cependant qu'il soit facile de réprimer les abus dans une distribution d'eau. La surveillance de tous ces appareils multipliés, qui échappent à l'attention publique parce qu'ils sont établis sous le sol, est, au contraire, extrêmement pénible et exige la plus minutieuse attention" (Belgrand, 1875: 91,92).

Los valores indicados por Frontino para los diferentes acueductos, son mostrados por el autor en forma de tabla. En ella sitúa, para los nueve acueductos, los

valores que el autor romano da, en forma de *quinarios* y de metros cúbicos, utilizando el valor dado por Rondelet ($60 \text{ m}^3/24\text{horas}$), de acuerdo con lo distribuido, con lo indicado en los registros y con lo indicado por los fontaneros.

NOMS DES AQUEDUCS	VOLUMES D'EAU DÉBITÉS					
	D'APRÈS LA DISTRIBUTION		D'APRÈS LES REGISTRES DE L'ÉTAT		D'APRÈS LES JAUGEAGES DE FRONTIN	
	QUINAIRES	MÈT. CUBES PAR 24 HEURES	QUINAIRES	MÈT. CUBES PAR 24 HEURES	QUINAIRES	MÈT. CUBES PAR 24 HEURES
Appia.	704	42 240	841	50 460	1 825 ¹	109 500
Anio Vetus.	1 610	96 600	1 441	86 460	4 598	265 880
Marcia.	1 935	116 100	2 162	129 720	4 690	281 400
Tepula ²	445	26 700	400	24 000	445	26 700
Julia.	805	48 300	649	38 940	1 206	72 360
Virgo.	2 504	150 240	752	45 120	2 504	150 240
Absietina.	592	35 520	592	35 520	592	35 520
Claudia.	5 625	337 500	2 835	171 300	4 607	276 420
Anio Novus.			5 265	315 900	4 758	285 480
	14 018 ³	841 080	12 755	765 300	21 805	1 488 500 ⁴

Tabla 6. Valores en quinarias y metros cúbicos (Belgrand, 1875: 94).

De ellos extrae que el volumen máximo aportado a la ciudad es de 1.488.300 m^3 por día, poniendo en condicional el valor calculado por Rondelet para la *quinaria*. De hecho, Belgrand considera esta hipótesis falsa.

“Si les calculs de Rondelet étaient exacts, les aqueducs romains, d’après le compte de quinaires donnés par Frontin, auraient débité ensemble, en 24 heures, un volume d’eau de 1488300 mètres cubes. C’est encore une erreur très généralement répandue et on admet, d’après les calculs de Rondelet, que les aqueducs romains débitaient, en 24 heures, 1500000 mètres cubes. J’ai déjà fait voir que ces calculs étaient basés sur des hypothèses absolument fausses” (Belgrand, 1875: 94).

Compara los datos obtenidos con las medidas de la incrustaciones calcáreas tomadas en los diferentes acueductos, teniendo en cuenta los periodos de estiaje, en los que se produce una considerable reducción de las aportaciones de los manantiales, y se apoya en la formulación de Prony para concluir que los valores estimados por Rondelet son demasiado elevados para ser reales.

“En effet, il résulte des renseignements donnés par M. le colonel Blumensthal à M. l’ingénieur en chef Darcel, que les parois de l’aqueduc Marcia, découvert par lui vers la source, portent une épaisse croûte d’incrustations calcaires de 0,50 m de hauteur, à partir du radier, et une croûte plus mince d’un mètre de hauteur. La première correspondait évidemment à une section mouillée voisine des basses eaux, le sommet de l’autre, au contraire, devait se rapprocher du niveau des plus hautes eaux. L’aqueduc ayant 1,70 m de largeur, sa section mouillée, correspondant aux basses eaux, était égale à $1,70 \times 0,50 = 0,85 \text{ m}^2$, celle des hautes eaux à $1,70 \times 1,00 = 1,70 \text{ m}^2$. Or Frontin porte la section mouillée de l’aqueduc à 4690 quinaires, nombre qui, multiplié par 0,00042275 m^2 , section du quinaire, donne pour la section mouillée de l’aqueduc exprimée en mètres, 1,98 m^2 , nombre qui correspond à un niveau plus élevé que celui des plus hautes incrustations de l’aqueduc. Cette section mouillée est donc beaucoup plus grande que celle des basses eaux. La section mouillée des basses eaux est bien celle indiquée ci-dessus, c’est-à-dire 0,85 m. En effet, d’après ce que m’écrit le colonel Blumensthal, au sujet du débit de Marcia et de Claudia, ces deux aqueducs prenaient au plus 10000 onces d’eau. Le produit de l’once étant de 20,217 m^3 par 24 heures, le débit total des deux aqueducs était de $20,217 \times 10000 = 202170 \text{ m}^3$.

Marcia débitait donc environ 101 000 mètres cubes. On arrive sensiblement au même résultat par la formule empirique de Prony, en y introduisant les nombres suivants:

Section mouillée donnée ci-dessus, $\omega = 0,85$; périmètre mouillé correspondant, $\alpha = 2,70 \text{ m}^3$; et pente par mètre donnée par Rondelet, $I = 0,0025 \text{ m}^3$.

On trouve ainsi, pour la vitesse moyenne, $v = 1,45$, d’où: débit par seconde, 1,23 m^3 et débit par 24 heures $1,23 \text{ m}^3 \times 86400 = 106488 \text{ m}^3$. Il résulte de là que Frontin n’a pas opéré en temps de basses eaux” (Belgrand, 1875: 95).

Con todo ello elabora una nueva tabla en la que calcula los valores, que él considera que se aproximan más a la realidad, y de la que se deriva una segunda que establece los, según el autor, diferentes valores que adquiere la *quinaria* y que oscilan entre los 21 y los 61 $\text{m}^3/24\text{h}$.

NOMS DES AQUEDUCS	SECTION MOULÉE u	PÉRIMÈTRE MOULÉE x	PENTE PAR MÈTRE l	VITESSE MOYENNE v	DÉBIT PAR SECONDE	DÉBIT PAR 24 HEURES	OBSERVATIONS
	m. carrés.	mètres.	mètres.	mètres.	littres.	m. cubes.	
Anio vetus (en tête de l'aqueduc)	1,86	4,48	0,0023	1,67	3 110	268 900	Pente : 1 ligne 1/2 par pas (Rondelet).
Appia, aux Gemelles. . .	0,772	3,48	0,00134	0,98	755	65 000	Pente : 1 ligne par pas (Rondelet.)
Marcia.	"	"	"	"	"	101 000	D'après Blumensthal.
Tepula.	"	"	"	"	"	0	
Julia, 6 ^e milliaire. . .	0,510	2,16	0,00134	1,13	576	50 000	Pente : 1 ligne par pas.
Virgo.	"	"	"	"	"	61 000	Débit actuel.
Alsietina.	"	"	"	"	"	24 000	Débit de Rondelet, faute de mieux.
Claudia.	"	"	"	"	"	101 000	D'après M. Blumensthal.
Anio novus (en tête de l'aqueduc)	2,004	5,00	0,0023	1,63	3 300	285 000	Pente : 1 ligne 1/2 par pas.
TOTAL.						933 000	

Tabla 7. Estimación de caudales según las alturas de las incrustaciones (Belgrand, 1875: 98).

“On peut facilement, d’après cela, se rendre compte du produit moyen du quinaire aux châteaux d’eau des divers aqueducs” (Belgrand, 1875: 98).

NOMS DES AQUEDUCS	NOMBRE DE QUINAIRES (D’après Frontin)	PRODUIT EN 24 HEURES	
		TOTAL DE L’AQUEDUC	PU QUINAIRE
		mètres cubes.	mètres cubes.
Anio vetus.	4 398	268 000	61
Appia.	1 825	65 000	56
Marcia.	4 690	101 000	22
Julia.	1 206	50 000	41
Virgo.	2 304	61 000	24
Alsietina.	392	24 000	60
Claudia.	4 607	101 000	22
Anio novus.	4 738	285 800	60

Tabla 8. Valores estimados en m³/día para la quinaria según el acueducto (Belgrand, 1875: 98).

“Le débit total des aqueducs romains n’était donc pas de 1 500 000 mètres cubes, par 24 heures, comme on l’admet généralement d’après

les calculs de Rondelet. Le volume de 953000 mètres cubes donné ci-dessus paraît même très-exagéré” (Belgrand, 1875: 98).

La explicación de Belgrand es clara: los ingenieros romanos no estaban interesados en saber cuáles eran los volúmenes reales que suministraban, para ellos era suficiente con tener una idea aproximada del agua que podía pasar por el calix y con eso les bastaba.

“Si nous examinons le second tableau, qui donne le produit du quinaire pour chaque aqueduc, on voit que ce produit varie de 22 à 61 mètres cubes par 24 heures.

Les ingénieurs romains n’ont donc jamais eu la prétention de donner aux concessionnaires, au moyen de leurs calices, un volume d’eau déterminé à l’avance. Ils comptaient sur une sorte de débit moyen pour les orifices de même diamètre d’un château d’eau. Il est à remarquer, d’ailleurs, que si les calices étaient trop nombreux pour le débit de l’aqueduc, les grandes concessions étaient les premières atteintes” (Belgrand, 1875: 99).

Para Belgrand, la hipótesis de la que parte Rondelet, al suponer que los cálices estaban 12 dedos por debajo del agua, no deja de ser pura especulación. Para sostener su idea arguye el hecho de que Frontino, sumamente meticuloso en las explicaciones, no dice nada en absoluto acerca de la colocación de los cálices, aduciendo además que la altura del agua variaría según la época del año, abundando en la idea anteriormente expuesta de las diferentes aportaciones de los manantiales.

“Rondelet suppose que les centres des calices étaient à 12 doigts au-dessous du plan d’eau. C’est une simple hypothèse. D’après Frontin, les calices en bronze doivent avoir au moins 12 doigts de longueur et être placés sur la même ligne horizontale; mais, dans les recommandations si minutieuses qu’il fait à ses collaborateurs, il ne dit pas un mot de la hauteur du plan d’eau au-dessus de la ligne des centres. Cette hauteur était nécessairement variable, et plus grande en temps de hautes eaux qu’en temps de sécheresse extraordinaire. L’orifice de trop plein du château d’eau n’était certainement pas placé au niveau correspondant à ces sécheresses. Ces petites variations de niveau n’avaient pas une action bien sensible sur les débits tant que les calices ne se découvraient pas, parce que les vitesses d’écoulement sont proportionnelles à la racine carrée des charges; par exemple, le volume d’eau reçu par l’usager dont l’orifice de sortie était à 2 mètres au-dessous du plan d’eau moyen du château d’eau, variait de 5 p. 100 à peine, lorsque ce plan d’eau s’élevait ou s’abaissait de 10 centimètres. Il en était de même lorsque

les bords des calices commençaient à se montrer: un petit abaissement ne diminuait pas considérablement le débit de la prise d'eau. La figure suivante fait voir combien il était nécessaire que les centres ou mieux encore les points bas des calices d'un château d'eau, fussent tous placés sur la même ligne horizontale. Avec cette disposition, les premiers calices qui paraissaient au-dessus de l'eau, en temps de sécheresse extraordinaire, étaient ceux d'un grand diamètre. Ainsi le septénaire, qui avait 0,0163 m de rayon, était découvert de près de 1/3 de ce rayon lorsque le quinaire, dont le rayon était de 0,0116 m, était encore complètement immergé" (Belgrand, 1875: 99-100).

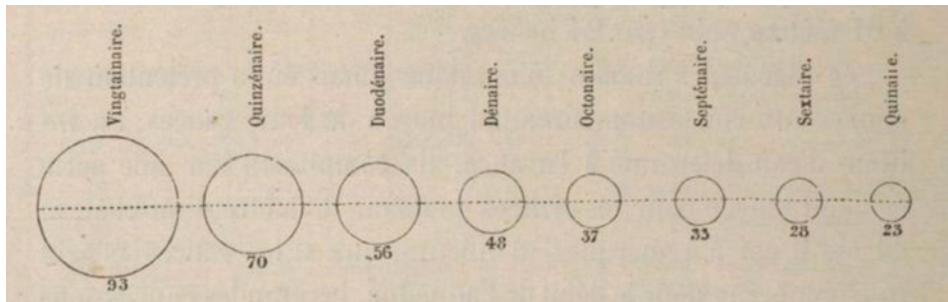


Tabla 9. Secciones comparativas de los distintos diámetros de tubería, desde un eje común (Belgrand, 1875: 100).

Como conclusión, Belgrand establece que, desde su óptica, el suministro de agua se hacía por estimación. Así, cada usuario recibiría una cantidad de agua variable, adaptada a la captación. Como él mismo afirma, el servicio se regularía por sí mismo. El hecho de que Rondelet asigne valores constantes a los suministros le resulta al autor un tanto sorprendente puesto que, partiendo de alturas distintas, sus aportaciones también lo serían.

“Le débit de la concession d'eau romaine se faisait en quelque sorte par estimation, à peu près comme nos abonnements à robinets libres. En plaçant convenablement (apte) le château privé, le curateur des eaux savait que chaque usager recevrait un volume d'eau suffisant en toute saison. Mais ce volume n'était une constante ni pour les calices de même diamètre, ni pour chaque calice d'un château d'eau. Le service se réglait de lui-même, comme je viens de le dire: en temps de crue des sources, l'eau s'élevait à l'orifice de trop plein et se déversait dans le compartiment du château réservé aux fontaines publiques et aux pièces d'eau. En temps de sécheresse, le niveau s'abaissait et le débit de chaque

calice diminuait au fur et à mesure que la portée des sources diminuait elle-même.

Il est singulier que Rondelet ait attribué aux calices un débit déterminé puisqu'il savait que ces calices se prolongeaient, par une conduite forcée, jusqu'au domicile de l'usager, et qu'ainsi non-seulement l'orifice de sortie de l'eau était à un niveau différent pour chaque concession, mais encore que la longueur et le diamètre de la conduite étaient eux-mêmes variables" (Belgrand, 1875: 101).

Es probable que la controversia suscitada entre los diferentes autores, contemporáneos y compatriotas, debió de animar la polémica, influyendo además en sus trabajos relacionados con el suministro de agua a París, de ahí que sus escritos, de marcado carácter técnico, se encuentren adornados con introducciones como esta, en la que la comparación entre la época clásica y la actual suponía un duro reto, sobre todo teniendo en cuenta los graves problemas de salubridad a los que las grandes ciudades del siglo XIX se vieron abocadas. Es por tanto lógico pensar que el acercamiento a los mismos problemas en épocas pasadas debió de atraer a más de un técnico, que trataría de obtener respuestas a los problemas que se les planteaban.

Por lo que se refiere a la argumentación en torno al tema que nos ocupa, es importante destacar la visión que este autor aporta. Ciertamente, su tratamiento no se basa en la búsqueda de fórmulas que traten de explicar el modelo de comportamiento de la ciudad de Roma, partiendo de los datos suministrados por Frontino. En este caso lo que hace Belgrand es plantearse hasta qué punto es razonable establecer un valor único para la *quinaria*, lo que deriva en un replanteamiento del propio concepto: ¿se trata de una una unidad de medida o simplemente de una sección para una tubería que sirviera de control de caudales? A la vista de los resultados, resulta obvio que el autor responde negativamente a la primera cuestión y positivamente a la segunda.

Es decir, Belgrand entiende que Rondelet yerra al tratar de encontrar un valor único, y de ahí que sus números sean excesivamente elevados. Por el contrario, su razonamiento se basa en la más pura experiencia, aunque no sea la suya, y apoyándose en datos obtenidos sobre el terreno (altura de las incrustaciones calcáreas de los canales), deduce una nueva evaluación de los caudales que, además, le da resultados diferentes para cada acueducto, lo que justifica con más fuerza su idea de que los valores para la *quinaria* eran desiguales.

Resulta por tanto interesante su forma de afrontar la problemática; sus resultados son inéditos y, por tanto, contribuyen a que las conjeturas sigan siendo el campo en el que se mueven los investigadores.

Cabe destacar por ultimo que Belgrand bebe en las fuentes de Prony y Rondelet, a los que nombra en su texto, siendo el segundo su mejor referente, sobre todo para rebatir sus argumentos.

3.6. Clemens Herschel

Nació el 23 de marzo de 1842 y falleció el 1 de marzo de 1930. Fue un ingeniero hidráulico estadounidense. Su carrera se extendió desde aproximadamente 1860 a 1930, y es sobre todo conocido por desarrollar el medidor de Venturi, que fue el primer dispositivo a gran escala, preciso para medir el flujo de agua. Entre sus obras destacan *The two books on the Water supply of the City of Rome of Sextus Julius Frontinus* (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913) de los que realiza la traducción al inglés y en los que figura un capítulo sobre la medida del agua, que es el que aquí nos ocupa.

Herschel inicia su discurso tratando de identificar el problema. En tiempos de Frontino, viene a decir, la ignorancia acerca del concepto de velocidad, supone el principal escollo.

“Let us see what ideas were extant on hydraulics, in Frontinus’ time. The most troublesome point of ignorance he had to contend with was a total inability to measure the velocity of water, or even to rightly and fully grasp the idea of such velocity, whether as flowing in an open cannell or in closed pipes” (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 201).

En su planteamiento, el autor norteamericano considera relativamente sencillo para el conocimiento actual (1899) el problema que se plantea, de hecho, para cualquiera, es evidente la ley de la gravedad, en tanto que resulta algo más complicado hallar el volumen de un cilindro, afirma Herschel, conociendo sólo el valor del área de su base.

“To the expert of today this seems excessively silly; and yet the same thing is constantly being done even now by those who ought to know better. The average man today will talk about “a stream of water that will fill a six inch pipe”, a perfect parallel to the quinary of frontinus; and there are hundreds of deeds on record conveying “square feet of water” for power purposes, just as though the law of falling bodies and its application to hydraulics had never been discovered; and unmindful of the fact, as one old Italian writer on water-rights has expressed it, that to speak of a stream of water by its area of cross-section is like estimating the volumen of a cylinder merely from the area of its base” (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 201-202).

Entrando de lleno en la determinación del valor de la *quinaria*, Herschel afirma que se trata de un problema que parte de una base equivocada. Todos los autores que han tratado el tema han utilizado los principios que Prony enuncia, obviando el hecho de que el autor francés los pone en condicional, de modo que dan como correcto lo planteado por Prony; todos excepto Belgrand, lo que les ha llevado sistemáticamente, asegura Herschel, a utilizar valores exagerados para el suministro de agua a la ciudad de Roma.

“Let us here take up the much discussed question as to the quantity of water wich constituted what Frontinus called a quinaria, and wich was his unit of measurement for water in motion.

This determination of the quantity of water in a quinaria lies at the foundation of determining how much water was delivered to ancient Rome by its aqueducts, a question about wich probably more nonsense has been writen, or rather repeated or compiled, tan about many another. The original sinner in the regard, as it has taken me many weary hours to discover, was Prony (“Memoires del l’Académie Royale” Vol. II., A.D. 1817). Prony says that if we asume that the head acting on the quinaria ajutage was equal to is length, this being the custom in Rome in 1810 with respect to the “uncia Romana”, and if we assume a discharge freely into the air, the value of the quinaria wil be thus and so (about sixteen thousand United States gallons per twenty four hours)⁵, being more tan three times what it probably was, as I shall presently show. Every writer I have seen of a date since then except Blumenstihl and Belgrand, and worse than that, every encyclopaedica or other compiler since 1817, has ignored the two “ifs” of Prony; then, using Prony’s conjeture as a fact, and otherwise exaggeranting quantities, has estated the consumption in Rome to have been the enormous quantities we have all seen in print, namely, fifty million cubic feet, or tree hundred and seventy five million United States gallons, in twenty fours hours” (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 212).

Siguiendo su propio razonamiento, y según lo indicado por Frontino para el agua *Marcia*, el valor de 4.690 *quinarias* se correspondería con el de una sección en movimiento a lo que denomina como una velocidad “aceptable”. Esta velocidad la sitúa en 3,25 pies/segundo, de modo que, conociendo la sección de la *quinaria*, 0,632 pulgadas cuadradas, el resultado sería de 9.250 galones americanos.

5. 16.000 galones americanos (3,79 l/g) equivalen a 60,64 m³/24h. (Nota del autor).

A continuación se acompaña tabla explicativa con traducción a unidades del Sistema Internacional.

TABLA DE CONVERSIÓN DE UNIDADES AMERICANAS A UNIDADES DEL S.I.			DATOS EXTRAIDOS DE (HERSCHEL, 1899 (2ª edic. 1913), p. 212)
GALONES AMERICANOS	0.003785400000	m3	So that the most that we could learn would be that the velocity, the maximum at that point, was about 3.25 feet per second. So that we know that when a quinaria pipe measuring 0.632 square inch (English) was running at the rate of 3.25 feet per second, it was still discharging only a quinaria water. Under the circumstances stated a quinaria was therefore about 9.250 United States gallons per twenty four hours, equal to about 0.0143 cubic foot per second. Unquestionably it was still a quinaria of water when the velocity of the water was only two feet per second, and very likely when it was only two feet per second. In other words, the value of a quinaria ranged presumably, from about 0.0143 cubic foot per second, equal to 9.250 United States gallons per twenty four hours, to 0.0044 cubic foot per second, equal to 2.850 United States gallons per twenty four hours
PULGADA INGLESA	0.025400000000	m	
PIE AMERICANO	0.304800000000	m	
PULGADA CUADRADA	0.000645160000	m2	
PIE CUADRADO	0.009290304000	m2	
PULGADA CÚBICA	0.000016387064	m3	
PIE CÚBICO	0.028316846592	m3	
VALORES CALCULADOS POR HERSCHEL EN UNIDADES AMERICANAS PARA MÁXIMOS			
VELOCIDAD MÁXIMA	3.2500000000000	feet per second	
SUPERFICIE QUINARIA	0.6320000000000	square inch	
DESCARGA DE UNA QUINARIA	9250.0000000000000	United States gallons per twenty four hours	
	0.01430000000000	cubico foot per second	
TRADUCCIÓN DE VALORES A UNIDADES S.I.			
VELOCIDAD MÁXIMA	0.9906000000000	m/s	
SUPERFICIE QUINARIA	0.0004077411200	m2	
DESCARGA DE UNA QUINARIA	35.0149500000000	m3/24h	
	0.0004049309063	m3/s	
VALORES CALCULADOS POR HERSCHEL EN UNIDADES AMERICANAS PARA MÍNIMOS			
VELOCIDAD MÍNIMA	1.0025316455696	feet per second	
SUPERFICIE QUINARIA	0.63200000000000	square inch	
DESCARGA DE UNA QUINARIA	2850.0000000000000	United States gallons per twenty four hours	
	0.00440000000000	cubico foot per second	
TRADUCCIÓN DE VALORES A UNIDADES S.I.			
VELOCIDAD MÁXIMA	0.3055716455696	m/s	
SUPERFICIE QUINARIA	0.0004077411200	m2	
DESCARGA DE UNA QUINARIA	10.7883900000000	m3/24h	
	0.0001245941250	m3/s	

Tabla 10. Conversión unidades (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 212).

De la tabla 10 se deducen dos valores para la *quinaria*. Herschel los define como de máximos y de mínimos y corresponden a 35 m³/24h para una velocidad de 0,99 m/s y 10,79 m³/24h para una velocidad de 0,30 m/s.

El autor no aclara el método seguido para obtener caudales y velocidades, por lo que se entiende que sus conclusiones las extrae de su propia experiencia.

“As we have seen, we can form a very close approximation to the maximum discharge of Marcia at the intake. And as Frontinus tells us that Marcia had at that point 4,690 quinariae, one might at first thought believe that the value of a quinaria could thus readily be arrived at. But 4.690 quinariae are nothing but a measure of the área of the cross-section of the flowing stream where it had an acceptable or normal velocity. So that the most that we could learn would be that the velocity, the maximum at that point, was about 3.25 feet per second. So that we know that when a quinaria pipe measuring 0.632 square inch (English) was running at the rate of 3.25 feet per second, it was still discharging only a quinaria water. Under the circumstances stated a quinaria was therefore about 9,250 United States gallons per twenty four hours, equal to about 0.0143 cubic foot per second. Unquestionably it was still a quinaria of water when the velocity of the water was only two feet per second, and very likely when it was only two feet per second. In other words, the value of a quinaria ranged presumably, from about 0.0143 cubic foot per second, equal to 9,250 United States gallons per twenty four hours, to 0.0044 cubic foot per second, equal to 2,850 United States gallons per twenty four hours”⁶ (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 212).

A pesar de lo que mantiene en el párrafo anterior, sus conclusiones finales son diferentes, fijando un máximo de 6.000 galones y un mínimo de 2.000, y aseverando que sus cálculos no son exactos, sino que con ellos tan solo pretende una aproximación, puesto que Frontino no llega a aclarar en qué circunstancias se produce la medición que realiza.

“A quinaria was about 5,000 or 6,000 United States gallons per twenty four hours, plus or minus 2,000 or 3,000 United States gallons, according to circumstances, favorable or unfavorable. It made no pretense of being an exact measure. Had it been more exact, a great deal that seriously troubled Frontinus would have been explained. But then, on the other hand, it would in that case have been some 1700 years ahead of its time,

6. 9.250 galones americanos equivalen a 35.057 m³/24h y 2.850 galones americanos a 10.801 m³/24h. (Nota del autor).

and Frontinus would in all likelihood have had “no use for it” , as goes the phrase of today”⁷ (Herschel, 1899, 2ª edic. 1913): 215).

Del trabajo de Clemens Herschel es posible deducir algunas cuestiones que afectan al problema general de determinación del valor de la *quinaria*. Una de ellas es la de la dificultad de saber el volumen partiendo de la superficie de un objeto. El autor lo plantea como algo menos que insoslayable; no obstante, aplicando su conocimiento, llega a definir un arco amplio de velocidades y en consecuencia de caudales, dando por supuesto que tan solo se trata de estimaciones poco precisas.

Aunque también el autor norteamericano es el mismo que critica sin pudor a sus colegas europeos, por aceptar, afirma, los “ifs” de Prony, excluyendo de esa lista tan sólo a Belgrand (Blumenstihl tan solo mide las alturas de las concreciones calcáreas en los acueductos romanos, datos que Belgrand utiliza), sin cuestionar si las condiciones que impone Prony son ciertas o erróneas.

En resumen, se podría concluir que Herschel no aporta nada al debate, dejando en el aire tanto sus métodos como sus resultados, puesto que él mismo los considera aproximados, a lo que añadiría que también poco documentados.

3.7. Claudio Di Fenizio

Dr. Ingeniero civil, trabajó para la Comuni di Roma desde la que realizó varios estudios sobre la capacidad de los antiguos acueductos romanos. Fue en 1916 cuando divulgó su primer trabajo (Di Fenizio, 1916), del que posteriormente publicó un apéndice (Di Fenizio, 1930) y estudios sobre la medida del pie romano (Di Fenizio, 1937) y sobre la ubicación del depósito del acueducto *Marcio* (Di Fenizio, 1931).

El planteamiento de Di Fenizio parte de la idea de instalar sobre un canal a lámina libre un partidor que permita pasar el agua por el fondo; de esta manera se creará una diferencia de altura h y dos velocidades, la anterior al partidor y la posterior, sobre esta base, y aplicando la fórmula:

$$Q = \mu_p A \sqrt{2gh},$$

donde Q es el caudal

7. 5.000 galones americanos equivalen a 18,95 m³/24h. 6.000 galones americanos a 22,74 m³/24h. 2.000 galones americanos a 7,85 m³/24h. 3.000 galones americanos a 11,37 m³/24h. (Nota del autor).

μ_p es el rozamiento

A el área del canal

g la aceleración de la gravedad

h la altura (en este caso la diferencia aguas arriba-aguas abajo del canal)

Se puede de este modo calcular el volumen de agua transportada por un determinado acueducto. La altura h, afirma Di Fenizio, es posible averiguarla tomando como referencia la colocación en línea de los diferentes tubos que daban agua desde los depósitos; entre el mayor y el de cinco la diferencia es de 11,5 cm, que será la que aplique en su fórmula.

L'idrometria moderna ci odre due vie de seguire:

1° Possiamo servirsi della dormula in uso per la determinazione della portata delle bocche a battente con paratoia; bocche anche oggi adottate, sia nei rigolatori di portati installati ni canali a pelo libero; sia nelle prese ad incile munito.

Tale formula è notoriamente:

$$Q = \mu_p A \sqrt{2gh}$$

ove h è il dislivello tra i peli d'acqua a monte ed a valle de la paratoia; A l'area della bocca. Per μ_p (coefficiente di efflusso) si ammette gerelamente che esso, per una bocca di largueza b e di altezza a tenda verso 0,65 per $2 \times a < b$ e verso 0,70 per $2 \times a > b$; inoltre se la bocca ha la medesima largueza del canale, senza soglia sopraelevata dal fondo, seguita da un lungo canale, si ammette in media $0,70 \times 0,95 = 0,665$.

Notiamo in ogni modo che questo coeficiente, qualora sia dedotto sperimentalmente su canali in esercizio, contiene in sè l'influenza delle velocità dell'acqua di arrivo e di rigurgito (Di Fenizio, 1930: 5).

De este cálculo el resultado sería para el agua Marcia el siguiente:

$$Q = \mu_p A \sqrt{2gh},$$

donde Q es el caudal

μ_p es el rozamiento = 0,74

A el área del canal = $0,7145 \times 1,55 = 1,10 \text{ m}^2$

g la aceleración de la gravedad = $9,81 \text{ m/s}^2$

h la altura (en este caso la diferencia aguas arriba-aguas abajo del canal) = 0,115 m

$Q = 1,231 \text{ m}^3/\text{s} = 106.358,4 \text{ m}^3/\text{día}$

Si aplicamos el resultado obtenido por Frontino en *quinarias* para el agua *Marcia*: 2.944, y dividimos por el caudal (Q), el resultado es de 36,127 m³/*quinaria*, pero si traducimos, siguiendo a Frontino, la superficie con la que hemos calculado el área a *quinarias* (cada *quinaria* es 0,0004192 m²), vemos que el resultado es menor: 2.624 *quinarias*. Aplicando este valor, en lugar de 2944, obtenemos: 40,6 m³/*quinaria*, que es el valor que da por válido Di Fenizio.

De ahí puede deducirse también la velocidad, entendiendo que $Q = S \times V$; con lo que $V = 0,42$ m/s.

Para encajar con los datos de Frontino, es decir con 2.994 *quinarios*, es necesario elevar la altura (h) a 0,15 m:

“Il minimo valore ammissibile per l’altezza di carico risulta per tanto de 0,15 metri e di conseguenza il minimo valore ammissibile per la quinario risulta di 0,47 litri al secondo, ovvero metri cubi 40,6 in ventiquattro ore” (Di Fenizio, 1916: 35).

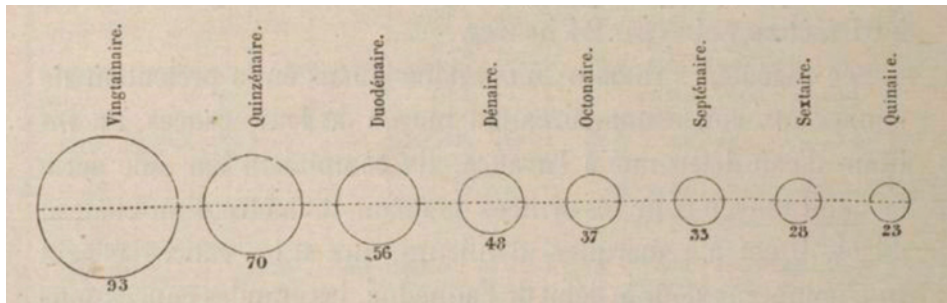


Tabla 11. Secciones comparativas de los distintos diámetros de tubería, desde un eje común (Belgrand, 1875). Este modelo de Belgrand es el que utiliza Di Fenizio como referencia, de manera que, desde el eje central común hasta la clave del mayor, la diferencia es de 11,5 cm.

De los resultados de Di Fenizio se infiere que su cálculo está basado en la fórmula más moderna que podía emplearse en ese momento. Para resolver el resto de incógnitas, el ingeniero italiano utiliza un modelo aproximado, ya descrito anteriormente, basado en la diferencia de altura del agua en dos puntos de un canal en el que se ha introducido un partidior. En cuanto al coeficiente de fricción o rozamiento, utiliza el que por experiencia práctica es comúnmente empleado para esta fórmula en ese momento.

Como puede verse, el sistema empleado presenta numerosas dudas, parámetros cuestionables y resultados que, cuanto menos, deben ser revisados.

3.8. Thomas Ashby

Arqueólogo británico nacido en 1874 en Middlesex y fallecido en Londres en 1931, autor de numerosos textos relacionados con la antigua Roma, entre ellos el que aquí es objeto de estudio, en su apartado dedicado a la *quinaria* (Ashby, 1935).

Ashby comienza su exposición explicando los errores que se cometieron al determinar los caudales, según Frontino. Determina la unidad de medida como la *fistula quinaria* y expresa sus dimensiones.

“According to Frontinus, the principal cause of the discrepancy which he discovered was an erroneus calculation by the original Imperial administration, whose figures had been accepted without question. The unit was the fistula quinaria, a pipe one and a quarter digits in diameter; made, according to Vitruvius, thought by some to have intoduced the standard, from a sheet of lead five digits broad before manufacture” (Ashby, 1935: 28-29).

El suministro de agua, explica el autor, no estaba sometido a presión, y son dos los factores determinantes, la velocidad y la sección. Aclara asimismo que Frontino conocía el sistema de funcionamiento, si bien cometió diversos errores que, a su juicio, distorsionan la medida, entre ellos el no considerar las pérdidas que se producían en el recorrido, así como el hecho de que simplificó en exceso al considerar suficiente situar los tubos de diferentes secciones a la misma altura, con la idea de que suministraran caudales similares. Todo ello es debido a que hay dos aspectos que pasó por alto: por un lado, el hecho de que el caudal no era continuo; y por otro, el que cuatro tubos de cinco no equivalen a un tubo de veinte. Ello provoca que sea complicado calcular un valor para el caudal de cada acueducto.

“The supply in the aqueducts themselves was not designed to be a preasure-supply; nevertheless, this basis calculation leaves out two important factors, the velocity or the current and the differences in the sices of the channel. Frontinus was well aware that the rate of fall made a difference to the amount discharged, and called in the factor velocity to explain the figures for the Anio Novus. But he did not see that these factors upset his calculations of the losses between intake and distribution-tank. A second source of error lay in his reckoning of the comsumption from the distribution-tank. He was aware that pipes at different angles to the flow, or at different heights in the tank, consumed differents amounts. To equalize consumption, he thought it sufficient that all the outlets in the tank should be placed at the same heights and at the same angle to the

current. But others factors had here to be taken into consideration, for the supply between the tank and the consumer became in effect a low-pressure supply, in which the points governing the consumption are the height of the water in the tank in relation to that of his feed-pipe in the tank, the size of pipe used, and the time for which each pipe is flowing. Frontinus took into account only the last two factors, with erroneous assumptions in both. He assumed that the water flowed at a continuous rate, which is uncertain; and, as Herschel pointed out, his statement that a 20-unit pipe would consumed the same amount as four 5-unit pipes is a serious error, for the ratio of flow to flow in two given pipes is not that of their respective cross-section. Thus, his calculations at both stages in the supply are demonstrably useless as an exact indication of the quantities supplied or consumed” (Ashby, 1935: 29).

No obstante lo anteriormente indicado, el autor británico acepta como buenos los cálculos modernos (1916) realizados por el italiano Di Fenizio, en los que este asevera que la *quinaria* equivale a 0,48 litros por segundo o 41,5 m³/24h. Obsérvese que Di Fenizio calcula 0,47 l/s y 40,6 m³/24h. (Vid. *supra* 4.7) y desarrolla una tabla, que reproducimos, en la que calcula los caudales en metros cúbicos y galones para cada acueducto.

	<i>Quinariae</i>	<i>Litres</i> <i>Per second</i>	<i>Gallons</i>	<i>Cubic metres</i> <i>Per 24 hours</i>	<i>Gallons</i>
Appia . . .	1,825	876	193	75,737	16,662,140
Anio Vetus . . .	4,398	2,111	464	182,517	40,153,740
Marcia . . .	4,690	2,251	495	194,365	42,760,300
Iulia . . .	1,206	579	127	50,043	11,009,460
Virgo . . .	2,504	1,202	264	103,916	22,861,520
Alsietina . . .	392	188	41	16,228	3,470,160
Claudia . . .	4,607	2,211	486	191,190	42,061,800
Anio Novus . . .	4,738	2,274	500	196,627	43,257,940
Totals . . .	24,360	11,692	2,570	1,010,623	222,237,060

Tabla 12. Cálculo de caudales (Ashby, 1935: 30). Tépula no aparece en su relación (445, Fronti., *Aq.*, LXVIII).

“Nevertheless, on the basis of a pipe of *quinaria*-size, and the cross-sectional measurements taken by Frontinus at the source, modern calculations have ben made as to the amounts of the supply for each aqueduct. The latest calculatation, made by Di Fenizio, and adopted by the *Livellazione*, takes the *quinaria* at 0,48 litre per second, or 41,5 cubic

metres in twenty-four hours: this is slightly above the possible minimum. The result then appears in the following table:" (Ashby, 1935: 29-30).

En Ashby podemos encontrar dos elementos de razonamiento contradictorios, pues por un lado afirma que no es posible dar un valor concreto a la *quinaria*, y por otro adopta el valor establecido por Di Fenizio (Vid. *supra* 4.7).

De su primera explicación cabe aclarar que la plantea basándose en argumentos lógicos. Ciertamente no es lo mismo cuatro tubos de cinco que uno de veinte. Los coeficientes de rozamiento son mucho mayores, con lo que la pérdida de carga aumenta considerablemente. Bien es cierto que, como él mismo afirma, esta idea la toma de Herschel (Vid. *supra* 4.6).

La otra aseveración que realiza se refiere al hecho de que el paso de agua no era continuo, y en este caso es necesario discrepar de ello, puntualizando que el caudal, con variaciones estacionales, era constante, salvo avería, dado que el sistema hidráulico no permitía la retención del agua por ningún medio. Por tanto, no es correcta tal afirmación y la idea de Frontino de suministrar en continuo, con carga constante, las diferentes fuentes y conducciones sí era factible.

Lo que sin duda parece deducirse de sus últimas explicaciones, en las que acepta como válidos los valores calculados por el ingeniero italiano, es que sus conocimientos no se asientan sobre una base muy sólida, dando por bueno, a pesar de las dudas expresadas en los párrafos anteriores, y sin mayores reparos, lo calculado por Di Fenizio.

3.9. Deane R. Blackman

Profesor asociado de Ingeniería de la Universidad de Monash, en el Departamento de Ingeniería Mecánica, el Dr. Blackman es autor de varios textos relacionados con la hidráulica romana, entre ellos el artículo que resume los datos de sus mediciones sobre cuatro de los grandes acueductos que suministraban a la ciudad (Blackman, 1978).

En los preliminares, el autor trata de determinar las condiciones necesarias para que el resultado de cualquier estudio sea minimamente fiable. Así, estima que la pendiente, la sección, la rugosidad y la variaciones en la sección son los factores que se precisa conocer para obtener buenos resultados. Cualquier enfoque, afirma Blackman, que simplique estos factores está abocado al error.

"If water flows in a long cannel of uniform slope and section then the deph will ultimately assume a steady vaue which an engineer calls the "uniform depth". The actual value of this depth depends, in a rather

complex way, not only on the slope and width and shape of the channel, but also on how rough are its walls; when the uniform depth is known and some estimate of the roughness is available the discharge may be calculated. This method has been used on a number of occasions, using one or other of several methods which allow for the roughness of the walls, to estimate the flow in ancient aqueducts; results from this simple approach are approximate because the condition that the slope be constant usually is not met, but the results will rarely be hopelessly in error” (Blackman, 1978: 53).

Bajo el epígrafe “asunciones necesarias” el autor fija los límites para sus cálculos, afirmando que en ellos no es posible tener en cuenta las desviaciones de caudal que puedan producirse a lo largo del trazado, ya sea por fugas o para atender a las villas. La razón que arguye es la ausencia de datos que puedan utilizarse de referencia, aunque, afirma el Dr. Blackman, estas desviaciones tienen poca importancia a la hora de calcular la capacidad de transporte de un determinado acueducto, y basa sus datos en los caudales en la captación y en la entrega observando la escasa diferencia entre ambos.

“My calculations have been made assuming that the discharge everywhere along the channel is the same, that is, no water has been added or has been diverted or lost. This assumption, in one respect, is patently false. The loss (or gain) by leakage is a matter of conjecture, though I feel Herschel gives this question rather too much prominence, but there are notices and remains of branches providing water supply to town and villas and of branches connecting together the main specus of the aqueducts. These latter were no doubt used as diversions during maintenance and, as Frontino records, some were in constant use.

I have ignored these problems firstly because there is a total lack of quantitative data of them, and secondly because they do not materially alter the results. If the four aqueducts are assessed as having a maximum capacity of, say, 7 m³/s near Rome then the redistribution or reticulation of water prior to this point cannot increase the quantity delivered to Rome itself. If our data were better it might be possible, by comparing the quantity of water had been lost or diverted. In fact, the data are about adequate to show that the maximum possible flow rates at the head and at delivery are the same order” (Blackman, 1978: 55).

En sus conclusiones, y tras la realización de las mediciones, Blackman, explica que el rango de entrega de los cuatro acueductos puede estar entre los

6,5 y 7,5 m³/s, por lo que adopta el valor medio, es decir, 7 m³/s que equivalen a 604.800 m³/día. Indica que este valor es menor que los 8,8 m³/s adoptados por Ashby, de acuerdo con otras estimaciones, y descarta los métodos usados por Di Fenizio, apoyados por lo descrito por Frontino. Asimismo, explica que su método de medición es independiente de ambos autores.

Aunque el autor norteamericano no calcula el valor de la *quinaria*, de su información es posible deducirla, puesto que los cuatro acueductos medidos son: *Anio Vetus*, *Marcia*, *Claudia* y *Anio Novus*. Si tomamos los datos de Frontino, sus volúmenes respectivos en *quinarias* serían: 4.398, 4.690, 4.607 y 4.738, (Frontino, 1985: 40), lo que supone un total de 18.433 *quinarias*. El resultado de la división entre el total estimado por Blackman y las *quinarias* calculadas por Frontino supone un caudal de 32,81 m³/*quinaria*.

“Collecting the numerical results together gives a range of possible discharge for the four aqueducts from 6,5 m³/s to 7,5 m³/s. A figure like 7 m³/s then represents both a mean value one rounded to indicate the likely accuracy of the estimate.

There have been numerous estimates of the discharge of the Roman aqueducts over the years; the most reputable current one is probably that of the Livellazione which is adopted by Ashby. For these four aqueducts his value is 8,8 m³/s, which is same sort of magnitude as the figure I have found. It should be pointed out, though, that Ashby's figure is calculated from an attempted reconstruction of the quinaria by di Fenizio and from Frontinus own values for the discharge. The latter are suspect, both paleographically and scientifically, and it is also questionable whether di Fenizio's estimate, which is based on the performance of the standard pipes described by Frontinus, is in fact applicable to the aqueducts even though the Romans used the same unit for the both pipes and channels. Under these circumstances, close agreement would not be expected. The strongest claim which can perhaps be made is that, since my own method is quite independent of Frontinus and di Fenizio, the modes agreement in the two estimates enhances the credibility of both and our confidence in how much water was actually delivered” (Blackman, 1978:71-72).

El trabajo realizado por el Dr. Blackman es, de los estudiados hasta ahora, el que podría definirse como de mayor carácter técnico. Lo hace siguiendo los patrones de un ingeniero: evalúa el problema, determina las condiciones de contorno, realiza las mediciones necesarias, señala las limitaciones del método empleado, fija los rangos de la estimaciones y concluye con un dato concreto. Como él mismo afirma,

su método es totalmente independiente de cualquier contaminación proveniente de la historia; obvia a Frontino y a Di Fenizio y parte de cero. Totalmente aséptico.

Todo ello le permite observar la cuestión como un problema de ingeniería sin más connotaciones. El autor no evalúa a Frontino; la información que proporciona este no le aporta nada; de hecho ni siquiera traduce sus datos a la unidad de medida del autor romano.

Desde mi punto de vista el sistema empleado tiene sus ventajas e inconvenientes. En cuanto a las primeras, la más notable es la ausencia de interpretaciones de la información de base. Por lo que se refiere a las segundas, destaco el alejamiento del contexto histórico, lo que hace que el resultado sea vulnerable ante la confrontación con el texto de Frontino. Pero este no es el trabajo que se ha propuesto el autor. Su tarea finaliza donde empieza la de los historiadores.

3.10. Carlos Fernández Casado

Carlos Fernández Casado, 1905-1988, ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, catedrático, miembro electo de la Academia de Bellas Artes de San Fernando e intelectual español. Es una de las referencias imprescindibles de la ingeniería civil española de las décadas centrales del siglo XX.

Además de numerosos trabajos de carácter técnico, fue un estudioso de los métodos constructivos romanos; en concreto, el texto aquí analizado se centra en varios de los más importantes acueductos romanos en España (Fernández Casado, 1972, 2ª Edic. 2008) y en la hidráulica aplicada al mundo romano (Fernández Casado, 1983).

En los dos textos reseñados, el autor efectúa un detallado análisis de los modos de captar, transportar y distribuir el agua, aplicado tanto a Roma como a los vestigios de acueductos situados en España, con algunas referencias a obras realizadas en Francia y en Turquía. Su trabajo, de carácter descriptivo, se centra en las realizaciones y en sus usos, así como en los métodos constructivos y su desarrollo estructural.

Sin embargo, en lo que se refiere a caudales distribuidos, no aparecen referencias de ningún tipo. El autor se contenta con indicar las dimensiones de los canales, ya sean estos aéreos o subterráneos y en la situación y distribución de depósitos y tuberías, ya sean estas de plomo o de barro.

La importancia de su trabajo radica en la pormenorizada relación, descripción y análisis de las estructuras sobre las que realiza el estudio.

3.11. Pietrantonio Pace

Nacido en Roma en 1944, es ingeniero nuclear por la Universidad de Roma y su actividad profesional se centra en la energía térmica e hidráulica. Su interés por la tecnología antigua le ha llevado a publicar artículos de divulgación científica y el libro que aquí analizamos (Pace, 1983).

Pace realiza una revisión de los datos de Di Fenizio y sustituye la altura de 0,115 m a 0,12 m, aduciendo que el agua estaría un poco más alta, en concreto 5 mm, y con esos nuevos datos obtiene resultados ligeramente mayores que los calculados por Di Fenizio: los 40,6 m/día los eleva a 41,5 m³/día.

“Aggiungendo, pertanto, 5 mm al valore in precedenza considerato si avrà l’altezza di carico più probabile pari a

$$0,115 + 0,005 = 0,12 \text{ metri}$$

e di conseguenza il valori più probabile della quinaria pari a

$$41,5 \text{ m}^3 \text{ in ventiquattro ore}$$

overo

$$0,483 \text{ litri al secondo}” \text{ (Pace, 1983: 65).}$$

La fórmula que utiliza es la de Ganguillet y Kutter

“La formula che nel 1931 permise al di Fenizio di convalidare lo storico risultato di 15 anni prima, è quella di Ganguillet e Kutter:

$$V = X \sqrt{R} \text{ i m/sec}$$

Con

$$X = \frac{23 + 1/n + 0,00155/i}{1 + (23 + 0,00155/i) \cdot n / \sqrt{R}}$$

ove

V = velocità dell’acqua nello speco in m/sec

n = coeficiente di scabrezza delle pareti e del fondo

R = raggio medio

i = pendenza

Il coeficiente di scabrezza $n = 0,01366$ fu da lui determinato ad hoc, assistito dagli ingg. Luciano Ghezzi ed Agostino Sacalfati, in un tratto

rettilineo dell'acquedotto Felice, rivestito di opus signinum del tutto simile e quello dell'acquedotto Marcio" (Pace, 1983: 67).

La revisión que hace Pace del trabajo de Di Fenizio sirve para reforzar los resultados que este obtuvo en 1916, tan sólo una ligera corrección de 0,9 m³/día de incremento, empleando una nueva fórmula para el cálculo.

3.12. Trevor Hodge

Trevor Hodge (1930-2012) nació en Belfast, Irlanda del norte. Doctor en Historia Clásica y Arqueología, ejerció como profesor en Estados Unidos y Australia.

Fue experto en acueductos romanos, en la colonización griega y en la tecnología antigua. Entre sus numerosos trabajos destacan *Roman Aqueducts and Water Supply*, y el que aquí nos ocupa "How did Frontinus measure the *quinaria*?", artículo publicado en la revista *American Journal of Archaeology* (Hodge, 1984).

Hodge se plantea en primera instancia la definición de *quinaria*, entendida como tubo de 2,3 cm de diámetro para luego preguntarse cómo es posible que de ello pueda deducirse un caudal, que además se aplica a canales abiertos, sin tener en cuenta las estaciones del año. No obstante, lo que afirma acerca de que los canales estaban a cielo abierto no es correcto.

"A quinaria (Frontinus always uses the Word as a noun) is the capacity or a pipe of "five quarter-fingers (quadrantes)", with a cosequent diameter of 2,3 cm. This raises two problems. The first is that it is purely a measurement of cross-section, irrespective of speed of flow. Second, how can a unit of measurement, based on the area of a closed pipe, be used to measure flow in the main channels of the aqueduct, which not only were open to the sky, but in which the water level ran high or low according to rainfall an season?" (Hodge, 1984: 205).

Señala el autor la dependencia que el caudal tiene respecto a la velocidad y la gravedad y estima despreciable la fricción. La velocidad, afirma, depende de la pendiente del canal y por tanto ambos son factores necesarios para determinar la cantidad de agua que circula.

"At this point we must face up to another phenomenon. Velocity in flowing water is created by two different factors, gravity and head (we may here neglect the negative and retarding effect of friction as insignificant). Gravity determines the velocity of flow in an open channel where,

in simply terms, the speed of the water depends on how fast it runs down the slope” (Hodge, 1984: 206).

Determina la fórmula por la cual se rige la velocidad: la raíz de 2 veces la gravedad por la altura.

“The actual relationship is given by the formula $v = \sqrt{2gh}$, or expressed in words, the velocity in the pipe is the square root of twice the acceleration of gravity (g) multiplied by the head (h)” (Hodge, 1984: 206)

Y de lo anterior, concluye que el caudal es la sección por la velocidad.

“...in formulaic form, $Q = A\sqrt{2gh}$, where Q is the Quantity of discharge and the Area of cross-section” (Hodge, 1984: 206).

Del planteamiento general, parece que Hodge da por buenos los resultados de Di Fenizio, aunque le surgen dudas en cuanto a la forma en que Frontino dedujo los caudales, puesto que sin más datos que la medida de superficie que obtiene resulta imposible estimar siquiera la velocidad del agua.

*“It thus appears that Di Fenizio’s value for the *quinaria* and Frontinus’ figures for the total discharge are both to be accepted as approximately correct. We now come to the key, and unresolved question: How did Frontinus do it? The problema is that he quotes figures for the main aqueduct channels, where, although he gives them in terms of *quinariae*, there is no question of adjutages or pipes; and there is no head, for we are dealing with water running in an open channel, under no pressure except gravity. Therefore we cannot estimate velocity by direct observation. How then could Frontinus measure the discharge?” (Hodge, 1984: 208).*

Tras desgranar el conjunto de test realizados en la Universidad de Ottawa, en los que se realizan pruebas de laboratorio en canales, mediante los cuales se procede a crear saltos, paradas con salida por abajo y por arriba, observando el comportamiento del agua, Hodge llega a la conclusión de que no es posible determinar la forma en que Frontino pudo llegar a establecer sus mediciones. Con ello, deja la puerta abierta a futuros trabajos, tratando de no subestimar la capacidad técnica de la antigua Roma.

*“If such considerations seems improbably sophisticated for ancient waterworks, our conclusions on frontinus’ measurement of the *quinaria* should warn us not to underestimate the sophistication of the Romans’*

hydraulic knowledge or skills. It remains my hope in noting these points that others may be able to build further on my observations and bring us closer to an understanding of this enigmatic but important monument” (Hodge, 1984: 216).

El trabajo que realiza este autor resulta, en cierto sentido, similar al realizado por Ashby. Ambos evalúan la situación, ambos tratan de comprender el proceso y ambos entienden que las dificultades para obtener un resultado son importantes, pero también los dos aceptan el valor de Di Fenizio como bueno, y ello a pesar de manifestar su dificultad para entenderlo. Bien es cierto que Hodge, cincuenta años después de Ashby, plantea un enfoque distinto para tratar de resolver la cuestión, pero no va más allá de realizar pruebas de laboratorio que le ayuden a entender mejor el comportamiento del agua en canales abiertos. Y después de su realización, su conclusión es desoladora: otros investigadores deberán llegar un paso más lejos y quizás averiguen cómo Frontino llegó a obtener sus mediciones; entre tanto habrá que aceptar, parece decir, los cálculos del ingeniero italiano.

3.13. Harry B. Evans

Profesor emérito de la Universidad de Carolina del Norte, está principalmente interesado en temas relacionados con la topografía romana. Ha publicado dos libros, entre los que se encuentra el que aquí nos referimos, *Water distribution in Ancient Rome. The evidence of Frontinus* (Evans, 1994). Igualmente, ha coeditado varios sobre este tema.

En la introducción, Evans hace una primera declaración de intenciones, pues considera que, a pesar de los estudios realizados, no se ha podido concluir que pueda existir una relación entre la *quinaria* y las unidades actuales de medida, lo que no impide que, para Frontino, sea una unidad coherente, por lo que, aunque no sea posible la traslación, sí es posible su utilización para entender la manera en que funcionaba el sistema de abastecimiento romano.

“The last few years have seen further investigation into Frontinus’ treatise and its statistics, specifically whether he could measure the quinaria by scientifically accurate methods, and, if so, how such measurements were taken. These studies confirm that while the quinaria cannot be converted into modern units of measurement, Frontinus regarded it as an accepted unit internally consistent and applicable to the statistics he reports in De aquaeducto (34.2-3). We can therefore use his data to determine the relative capacities and delivery of individual lines within Rome’s water system as a whole” (Evans, 1994: 5).

Determina Evans el probable origen del término *quinaria* como unidad de medida, limitándose a recoger lo expresado por Frontino en cuanto a sus dos posibles precursores, bien Agripa, bien Vitrubio.

“At a later period another units of measure developed, which is called the quinaria or 5-pipe, tanking its origin neither from the inch nor from either type of digits. It war introduced by Agrippa, as some people think, or according to others, by lead manufacturers under the direction of the architect Vitruvius, and his como into general use in Rome, replacing the other units of measure.” (Evans, 1994: 23).

Nos recuerda este pasaje, sin ejemplos numéricos y sin citarlo, lo expresado por Belgrand (Vid. *supra* 4.5), en el sentido de que la distancia y la diferencia de cota influyen en el caudal de forma significativa.

“We remember that all water, whenever it comes from a higher elevation and falls into a castelum within a short distance, not only corresponds to its original unit of measurement but also excedes it; on the other hand, whenever it is brought from a lower elevation, that is, under less pressure, for a longer distance, it also decreases its delivery because of the slowness of its passage. For this reason then, according to this reckoning, its delivery figures must be supplement or decreased” (Evans, 1994: 26).

Evans se limita a transcribir lo explicitado por Frontino, sin entrar en interpretaciones o traducciones de *quinarias* a metros cúbicos. En general, desarrolla el texto original con explicaciones sobre el funcionamiento del sistema de gestión de las aguas.

En conclusión, este autor no participa en el debate más que para mencionar el hecho de que los caudales son tales en función de la distancia y la altura a que se encuentre el *castellum* que alimenta a cada área urbana.

3.14. Rabun Taylor

Doctorado en Estudios Clásicos por la Universidad de Minnesota en 1997. Impartió durante diez años clase en el Departamento de Historia del Arte y Arquitectura de Harvard, antes de integrarse en la Facultad de Universidad de Texas en otoño de 2007.

Sus intereses investigadores se centran en la cultura material romana, si bien abarcan todas las áreas del arte clásico: arquitectura, arqueología, así como urbanismo, historia social y religión. Ha publicado *“La Moral espejo del arte romano”* (Cambridge, 2008), *Las necesidades públicas y placeres privados: distribución*

del agua, el río de Tibur, obra de la que aquí nos hacemos eco (Taylor, 2000) y *Desarrollo urbano de Roma antigua* (Bretschneider, 2000).

El factor velocidad y la distorsión que produce en el caudal es objeto de análisis en este párrafo. Para Taylor, Frontino explica que es preciso tomar los datos de caudal en el lugar en el que el agua no entre demasiado rápido ni demasiado lento.

De ahí el hecho, según el autor, de que Frontino buscara las condiciones ideales de medición, en las que la velocidad del agua que pasa a través de una fila horizontal de tubos en un depósito se iguala, puesto que las condiciones de presión eran las adecuadas.

“However, Frontinus does talk about the influence of water speed on his measurements. For example, in measuring the flow of the Aqua Virgo (which had no settling tank) at the seventh milestone, he notes that “the rate of flow is faster” (velociorem iam cursum habet, Aq. 70.3) than it is near the source, and thus more conducive to measuring volumen. Water that is moving too fast, however, affects the measurements adversely. The actual volumen of the Anio Novus “evidently even exceeds our measurements (at the intake). The reason for this is that the force of the water is so strong that, taken from a bountiful and Swift river, it increases its volumen by its very speed”. Frontinus evidently was looking not just for conditions that would favor an accurate measurement, but indeed for a particular water speed: one which, ideally, would equal the velocity of water passing through a horizontal row of measuring pipes in a tank under the correct head of pressure. When he found a place in the channel that approximated this speed (which would produce a Reading established from prior experimentation), he could directly translate the naturally flowing water’s area in cross-section of 22 100-pipes and one 40-pipe (i.e., 8,74 square feet)” (Taylor, 2000: 37,38).

Partiendo de los estudios de Di Fenizio (*Vid. supra* 4.7), en los que el ingeniero italiano propone el valor 40,6 m³/día, el autor norteamericano estima que el mismo es un valor demasiado alto y para ello se basa en los datos proporcionados por la medición realizada por Blackman, en la que, tras hacer comprobaciones en cuatro acueductos, realiza en metros cúbicos una estimación del volumen que transportaban (Blackman, 1978).

“Most modern studies generally accept Di Fenizio’s proposed volumen of a quinaria, 40.6 m³/day. It would now seem to be somewhat excessive when tested against Blackman’s 1978 calculations, which represent the most scientifically rigorous investigation of the flow of Rome’s aqueducts

to date. We begin with Frontinus' calculation of the total water capacity, 24,018 quinariae – 14,018 with authorized distribution (Aq. 74.4). This total capacity, not just what was delivered at or near the end, is crucial to our comparison, because Blackman's independent method using available raw archaeological data presumes "that the discharge everywhere along the canal is the same, that is, no water has been added or has been diverted or lost" (Taylor, 2000: 38-39).

Del trabajo de Blackman Taylor extrae sus propias conclusiones, en las que determina que el valor de la *quinaria* estaría en torno a los 32 m³/día. Para ello, extrapola el valor obtenido para los cuatro acueductos estudiados por Blackman, que suponen el 76,7% del total, al conjunto de los nueve que abastecían la ciudad de Roma. Este es el valor que el autor considera más próximo a la realidad y al que utilizará como elemento de comparación para el resto de sus trabajos, como él mismo indica.

"Blackman estimates that the four largest aqueducts alone delivered about 7 m³/sec., or 604,800 per day. According to Frontinus, the total capacity of these four aqueducts –The Anio Vetus, Aqua Marcia, Aqua Claudia, and Anio Novus– was 18,433 quinariae (Aq. 66.2; 67.2; 77.2; 73.2) or 76.7 percent of the total capacity of nine existing aqueducts, 24,018. If we apply this percentage to Blackman's estimate, we calculate that the total capacity in Rome's network 788,527 m³/day. Dividing this by the total numbers of quinariae, 24,018, we arrive at 32.8 m³/day. Given the futility of precise numbers in this game, and the fact Frontinus could not determine the capacity at intake of some of the smaller aqueducts, we can round downward to 32 m³/day – the figure I will use to represent a single quinaria" (Taylor, 2000: 39).

Taylor no realiza ningún cálculo por medios propios, sino que utiliza el trabajo de Blackman como referencia para determinar los resultados, dando plena validez a sus mediciones, y utiliza a Di Fenizio como elemento de comparación ya que este último es la referencia comunmente empleada.

3.15. R. H. Rodgers

Profesor de Lenguas Clásicas y Literatura en la Universidad de Vermont y autor de varios trabajos relacionados con la antigüedad clásica, entre ellos la traducción y comentarios de la obra de Frontino en lo relativo al concepto de *quinaria* (Rodgers, 2004).

El profesor Rodgers realiza una traducción al inglés de la obra de Frontino, tras la que desgana un importante aparato crítico en forma de comentarios, entre ellos los relativos a las diámetros y secciones relativas a los diferentes calibres reflejados en el trabajo del autor romano. Con respecto a la traducción de la *quinaria*, Rodgers se remite al apéndice C de su propio libro, en el que el asunto es analizado por el profesor Bruun (*Vid. infra* 4.16).

“Capit quinariam unam: Appendix C constains Professor Bruun’s discussion of various attemps, none successful, to determine the value of “a quinaria” expressed in modern terms of volumen and time” (Rodgers, 2004: 224).

El trabajo de Rodgers debe ser calificado desde el punto de vista de la lingüística y, por tanto, su interés reside en la importancia que, en sus comentarios, da el autor a las posibles traducciones de algunos términos latinos, que pueden dar lugar a diferentes interpretaciones. Así pues, su labor no entra en el campo de la historia, de ahí que remita al lector al estudio realizado por Bruun.

3.16. Christer Bruun

Christer Bruun enseña Historia Romana y Lengua Latina y Literatura en el Departamento de Lenguas Clásicas de la Universidad de Toronto, donde comenzó su carrera académica norteamericana en 1994.

El trabajo de Bruun se incluye como un apéndice de la obra de Rodgers.⁸

La afirmación con que inicia su trabajo es clara:

“It is not posible to translate the Roman quinaria into a modern expresión of volumen, such as m³/24 hours or litres/second. Many scholars have presented ingenious theories and calculations of how to stablish a value for the Frontinian quinaria...” (Bruun, 2004: 342).

Para explicar el cálculo, Bruun utiliza como referencias a Di Fenizio (*vid supra* 4.7) y a Pace (*vid supra* 4.11), y repite su cálculo, aunque confiesa que sólo conoce los datos del primero a través de lo indicado por el segundo:

“Di Fenizio’s work from 1931 is known to me only from the detailed presentation in Pace (1983) 66-7” (Bruun, 2004: 342).

8. BRUUN, C. (2004), The impossibility of reaching an exact value for the roman *quinaria* measure. Appendix C. En R. H. RODGERS, *Frontinus, de aquaeductu urbis roma*, Cambridge University Press, Cambridge, England.

La *quinaria* de Frontino. Un estado de la cuestión

Para iniciar su exposición, indica lo expresado por Di Fenizio en 1916 y 1931, con las correcciones que posteriormente hace Pace en 1983:

*“Many modern scholars have been persuaded by the calculations presented in 1916 (and, less well known, in 1931) by the Italian engineer Claudio Di Fenizio, who concluded that one Frontinian *quinaria* was equivalent to a delivery of at least 40,6 m³/24 hours (or 0.47 litres/second). A minor correction in the calculations was undertaken by Pace in 1983, whose estimates are 41.5 m³/24 hours and 0,48 litres/second for one *quinaria*. (It is sometimes forgotten that these are minimum estimates; according to the Di Fenizio-Pace formula the delivery could have been even greater” (Bruun, 2004: 342).*

En este punto, el autor da un breve repaso, a través de las indicaciones de Pace, de la forma en que Di Fenizio realiza el cálculo para canales abiertos y para tuberías cerradas, basándose en la altura del fluido sobre la tubería y el coeficiente de rozamiento adoptado, y en función del tipo de material sobre el que circula. La horquilla de velocidades obtenida, concluye, no permite saber con certeza el valor de la *quinaria*. Así, atendiendo a lo que Bruun denomina la fórmula *Di Fenizio-Pace*, obtiene valores que, dependiendo de la altura de la columna de agua, permiten obtener diferentes caudales y por tanto valores para la *quinaria*:

Para 0,10 m de altura 0,44 l/s y 38 m³/24horas para la *quinaria*.

Para 0,12 m de altura 0,48 l/s y 41,5 m³/24horas para la *quinaria*.

Para 0,13 m de altura 0,50 l/s y 43 m³/24horas para la *quinaria*.

Para 0,16 m de altura 0,55 l/s y 47,3 m³/24horas para la *quinaria*.

Y con estos resultados concluye:

*“This means that no unanimity exists for the value of the *quinaria*. Studies of the free-flow aqueducts recommend a lower estimate than Di Fenizio’s (minimum) figure of 0,48 l/sec, while, if we are to follow Di Fenizio’s own logic, calculations for the close-conduit *quinaria* would seem to advocate an even higher value. In particular, the value of the Frontinian *quinaria* seems to differ depending on the aqueduct, a fact which once again underlines that the Romans were not capable of calculating exactly the volumen of flowing water” (Bruun, 2004: 346).*

En resumen, este autor considera que el valor de la *quinaria* no es exacto, y varía en función del acueducto por el que circula. Afirma asimismo que ni los propios romanos eran capaces de calcular en volumen de agua que circulaba por sus canales y tuberías.

Procede resaltar en este trabajo cómo, curiosamente, el autor utiliza en varias ocasiones una fuente que conoce a través del trabajo de otro; aunque bien es cierto que lo explica al inicio de su exposición.

3.17. José Manuel de la Peña Olivas

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Trabaja actualmente el CEDEX y es autor de numerosos trabajos relacionados con las obras públicas romanas. El que aquí traemos fue presentado en el V Congreso de la Obras Públicas Romanas, organizado por el Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas en el año 2010. (De la Peña, 2010)

El posicionamiento del autor respecto al tema es palmario:

“Es habitual hoy en día entre los expertos intentar trasladar el concepto y uso de caudal actual a aquellas épocas, esto es, el volumen que pasa por la sección de la conducción en la unidad de tiempo. Aunque los romanos ocasionalmente lo manejaban (Frontino, III, 2), no era éste el que se utilizaba para la medición del agua que se distribuía; para ello se usaba la unidad de sección, que era la “quinaria”, que era aquella que tenía 5/4 de dedo, 2’31 cm, de diámetro y 4’19 cm² de sección. Y muchos trabajos se han afanado y se afanan, infructuosamente, en encontrar el equivalente entre caudal y quinaria” (De la Peña, 2010: 250).

De la Peña continúa su exposición sobre el tema contrastando algunas de las medidas que se dan, y que diferentes autores utilizan; en este caso, los valores calculados por Di Fenizio. Aunque, como ya se indicaba en el párrafo anterior, el autor se posiciona claramente a la hora de considerar la *quinaria*, no como una unidad de volumen, sino como una de comparación en la que las secciones eran lo que realmente importaba.

“El siguiente escalón en el conocimiento de la concepción que los romanos tenían de distribución del agua en la ciudades, es cómo medían el agua que repartían. A diferencia de cómo hoy en día se calcula, los romanos medían el agua por la sección de las conducciones, tomando una unidad tipo, la “quina- ria”, y no por caudal circulante. Algunos autores han querido transformar esta medida de sección en una medida de caudal, y así dan valores para la “quina- ria” de, por ejemplo: 40’6 m³/día (Egea, 2002). Otros autores lo pasan directamente a metros cúbicos (González Rolan, 1985 [en Frontino]), usando una equivalencia de 40 m³, otros 0’48 l/s (= 41’5 m³/día), etc. Lo cierto es que los propios romanos solamente comparaban secciones, y una transformación exacta

del caudal equivalente a la quinaria sería absurda, y no obedecería a la realidad; solamente se pueden utilizar valores comparativos aproximados dentro de una horquilla que vendría dada por el tipo de sección y la carga hidráulica, siempre que la tubería no fuese en carga” (De la Peña, 2010: 253).

De la procedencia del término, el autor ofrece un rastreo basado en las fuentes clásicas tradicionalmente utilizadas. Por lo que se refiere al valor de su superficie, también lo indica, cosignando que en centímetros equivale a 4,19 cm².

“Como el propio Frontino deja traslucir, no se sabía a ciencia cierta quién puso la quinaria como medida de agua, ni quién introdujo los sistemas de calibres. Aunque por los indicios dados por Frontino, sí se puede asegurar, con bastante probabilidad de acertar, que fue introducida “oficialmente” en tiempos de Agrippa y Vitruvio, y que fue el propio Agrippa, según Frontino (XCIX, 2 y 3), en un edicto, quien estableció la tabla de calibres de tuberías; si bien esto no quiere decir que fuese entonces cuando se crease la medida de la “quinaria”, ya que probablemente proviniese de mucho antes. Vitruvio no habla en ningún momento de quinarias; pero sí es cierto que el diámetro de una quinaria, 5/4 de dedo, está cerca de 5/3’14 que sería el valor real del diámetro de una circunferencia de 5 dedos de longitud. Lo cierto es que la unidad de medida era una superficie llamada “quinaria” que equivalía a:

$$1 \text{ dedo} = 1/16 \text{ pies} = 29'6/16 \text{ cm} = 1'85 \text{ cm}$$

$$1 \text{ quinaria} = 3'14 \times (5/4 \times 1'85)^2/4 = 4'19 \text{ cm}^2$$

(De la Peña, 2010: 254)

A pesar de lo indicado anteriormente, De la Peña, aclarando que sólo se trata de cálculos aproximados, nos lleva, a través de la formulación comúnmente empleada en la actualidad para canales a lámina libre (Formula de Manning), a la puesta en práctica del cálculo de caudal de una determinada sección (en este caso la de los nueve acueductos que suministraban a Roma). Los resultados de sus cálculos aparecen en la tabla 14.

“Las conversiones que han pretendido hacerse de esta medida en caudal nunca pueden ser rigurosas, aunque sí aproximadas, y como tales dar una idea general. Solamente, para determinar el caudal aproximado de agua se puede transformar la sección en caudal usando las características de la conducción. Así, si se supone un canal de agua de una anchura a, una altura sobre techo o clave H, y una altura de columna de agua L, la superficie mojada vendrá dada por:

$$S = a \cdot L$$

Y si esta superficie, dada en quinarias que es como Frontino lo da, se quisiera pasar a m², solamente habría que aplicar la conversión:

$$S(m^2) = [S(q) \times 4'19] / 10.000$$

Para determinar el caudal circulante en cada una de las conducciones se aplica la fórmula de Manning para canales:

$$Q = \frac{S}{n} R_H^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_0}$$

Donde: n es el número de Manning que para canales toma un valor de 0'013; S es la superficie mojada; RH es el radio hidráulico [$R_H = S/(a + 2L) = S a / (2S + a^2)$], e I_0 , es la pendiente del canal. Poniéndose en función de la superficie mojada y la anchura del canal, da:

$$Q = \frac{\sqrt{I_0}}{n} \left(\frac{S a}{2S + a^2} \right)^{\frac{2}{3}} S = A \frac{\sqrt{I_0}}{n}$$

Esta es la fórmula, en m³/s, que tiene que utilizarse para convertir las quinarias en caudal, indicando, por tanto, que depende de la pendiente del canal esta conversión; no ajustándose un número para una conversión general como algunos autores han pretendido, queriendo simplificar un problema sencillo, pero que necesita de otra variable importante que es la pendiente.

Respecto a la pendiente hay que hacer una serie de matizaciones técnicas hidráulicas e históricas:

1) La pendiente con que llega el agua a una red de abastecimiento no es la diferencia de cotas de la toma y la llegada a la ciudad, como habitualmente se supone, sino la pendiente real del canal en los últimos tramos, sin tener en cuenta las pérdidas de carga que se producen y provocan en ella, como la debida a resaltos o cascadas, que siempre debe ser tal que la velocidad en el canal sea menor de 0,5 m/s

2) La pendiente entonces recomendada en canales, la indican tanto Vitruvio (VIII, 7, 2): los canales "... deben ser lo más sólidas posible y

con una pendiente de no menos de un cuarto de pulgada por cada cien pies de longitud...”. Que da un valor de:

$I_o = 1/4\text{pulgada}/100\text{pies} = 1/4.1/12\text{pies}/100\text{pies} = 1: 4800 = 0'021 \%$
como Plinio (XXXI, 31, 57): “... la caída mínima del agua es de un cuarto de pulgada para cien pies...”, que, sin duda, usó a Vitruvio como fuente.

Ejemplo de este cálculo de la relación caudal circulante-quinaria se muestra en la tabla adjunta para los acueductos de abastecimiento a Roma usando los datos que proporciona Frontino” (De la Peña, 2010: 253-255).

CAUDAL POR QUINARIA EN CADA CONDUCCIÓN DE ROMA	
Conducción	Caudal (l/s) por quinaria
Apia	0'172
Anión Viejo	0'210
Marcia	0'196
Tépula	0'133
Julia	0'156
Virgen	0'192
Alsietina	0'130
Claudia	0'210
Anión Nuevo	0'211

Tabla 13. Cálculo de caudales (De la Peña, 2010: 255).

En la tabla ampliada por el autor de este trabajo, pueden observarse los caudales que De la Peña ha calculado. De ellos se desprende que el resultado varía entre los 18,144 m³/día de máximo hasta los 11,232 m³/día de mínimo, así como los volúmenes de agua total aportada a la ciudad, según los datos calculados por De la Peña.

CAUDAL POR QUINARIA EN CADA CONDUCCIÓN DE ROMA		CÁLCULOS DEL AUTOR DEL ESTUDIO		
Conducción	Caudal (l/s) por quinaria	Valor quinaria en m ³ /día	Quinarias por canal	Volumen suministrado en m ³ /día
Apia	0,172	14,861	1.825,00	27.120,96
Anión Viejo	0,210	18,144	4.398,00	79.797,31
Marcia	0,196	16,934	4.690,00	79.422,34
Tépula	0,133	11,491	445,00	5.113,58
Julia	0,156	13,478	1.206,00	16.254,95
Virgen	0,192	16,589	2.504,00	41.538,36
Alsietina	0,130	11,232	392,00	4.402,94
Claudia	0,210	18,144	4.607,00	83.589,41
Anión Nuevo	0,211	18,230	4.738,00	86.375,64
		TOTALES.....	24.805,00	423.615,48

Tabla 14. Completada con valores de la *quinaria* en m³/día, resultados de *quinaria* por canal y suministro total a la ciudad de Roma (fondo azul) sobre la original de De la Peña.

El pragmático punto de vista de De la Peña refleja un enfoque compartido por diferentes autores: la *quinaria* no es una unidad de volumen sino un elemento de comparación entre secciones de canal o tubería. No obstante, también es común que, tras esta conclusión, se realice una estimación de caudales con los datos disponibles; este caso no es una excepción y sus resultados muestran la amplitud en la gama de propuestas que los diversos autores han reseñado a la hora de realizar sus cálculos.

CONCLUSIONES

Tras el análisis de la información recogida, tanto de las fuentes primarias como de las secundarias, es posible desgranar algunas de las ideas que contienen:

La inclusión de Herón de Alejandría entre las fuentes primarias trata de aclarar un concepto objeto de discusión: el conocimiento o no de la velocidad como parte de la ecuación que, junto con la sección, define el caudal. En Frontino podemos apreciar que es consciente de que una mayor presión⁹ implica, para la misma sección, un incremento en el volumen; sin embargo, no profundiza más (Frontino, 1985: 32). Es Herón el que concreta, de manera taxativa, qué significa la velocidad y como se puede calcular, y lo hace utilizando un reloj de sol, el agua que pasa a través de un área determinada durante un espacio de tiempo (una hora) para luego pasarlo al día completo, y de esa forma poder saber el caudal diario. De ello se puede inferir que no se trata de un concepto ajeno a los hombres de la antigüedad.

En cuanto a Vitrubio, se puede afirmar que sólo permite vislumbrar el conocimiento disponible en temas de hidráulica más allá de generalidades. Es en general parco en sus explicaciones, lo opuesto a Frontino que pormenoriza hasta el detalle.

Por lo que se refiere a Plinio, su trabajo enciclopédico trata de recoger el máximo de información disponible, aunque sin entrar en detalles, al menos en lo referido a este tema. Probablemente Vitrubio sea su fuente.

Desde la perspectiva historiográfica, y desde hace doscientos años, la búsqueda de una ecuación que permitiera saber en medidas actuales cuánta era el agua suministrada a la ciudad ha sido constante.

De la lectura este trabajo se desprende que existe una serie de bases de partida comunes para todos los investigadores; no así el formulario, que ha ido evolucionando, perfeccionándose a lo largo del tiempo con nuevas aportaciones en forma de ecuaciones cada vez más complejas que permiten recoger los matices que el

9. Presión no es igual a velocidad según la concepción actual. Hay que entender que para Frontino una mayor presión indica que el agua llega con más ímpetu o, lo que es lo mismo, con más velocidad.

agua en movimiento, ya sea a presión o a lámina abierta, muestra. Los resultados que ofrecen son un más que amplio abanico de respuestas a la misma pregunta.

Sí resulta bastante evidente que el valor calculado ha ido decreciendo de modo sistemático. Ello es consecuencia directa de, como decía, el uso de fórmulas cada vez más complejas y que, por tanto, se aproximan más a la realidad que se pretende reflejar.

Con el Barón de Prony (1817), iniciamos este largo viaje. En él encontramos al ingeniero preocupado no ya por las aguas de Roma sino por las de París. Intenta por tanto resolver el problema de su propia ciudad, en la que la población aumentaba constantemente, no así el suministro, distribución y posterior evacuación de las aguas que servían para el consumo humano. Esta preocupación es la que le lleva a la Antigüedad Clásica y a Frontino. Es por tanto un cierto efecto secundario el que hace que intente encontrar una regla de conversión de los datos del autor romano a las suyas propias. En mi opinión, trata de entender cómo habían resuelto tan grave problema de manera satisfactoria.

Pero, al tratar de encontrar el valor de la *quinaria* de Frontino, se convierte en el primer investigador que, de una manera razonada, se acerca al tema y le da respuesta. Su lógica es la de su tiempo, al igual que sus conocimientos, y la fórmula que emplea no refleja la realidad del movimiento hidráulico. Aunque ello no le resta valor a su razonamiento, utiliza los instrumentos con los que cuenta y lo hace adecuadamente. Sus resultados le llevan a situar el valor de la *quinaria* en 56 m³/día.

Prony es el primero. Sin embargo, el más repetido como fuente posterior es J. B. Rondelet (1820), y ello es así porque introduce una forma diferente de enfrentarse al problema. Su razonamiento es más empírico que teórico y plantea la cuestión pensando que en los depósitos y no en el propio canal es donde está la respuesta. Al fin y al cabo, ahí es donde Frontino toma sus medidas.

Lo que Rondelet hace es intentar situar la altura a la que se encuentra el tubo de salida, aunque para ello comete un error, y desde ese razonamiento deduce la carga, es decir la altura de agua que hay sobre la salida. A partir de aquí, calcula el caudal que admite el tubo. Sus razonamientos le llevan a concluir que la *quinaria* equivale a 60 m³/día, un valor mayor que el calculado por Prony.

Siguiendo caminos distintos, el autor o autores del trabajo anónimo (1870), que cronológicamente sigue la estela de los dos autores anteriores, proponen una nueva idea: basar los cálculos en los restos existentes del agua *Marcia*, en concreto en las marcas dejadas por las concreciones calcáreas. Desde esta perspectiva, hace los cálculos utilizando una fórmula distinta, la de Darcy, para obtener un resultado

completamente diferente. En su exposición defiende sus postulados comparándolos con los de Rondelet, de quien afirma que sus cálculos le han llevado a la obtención de valores excesivos que fuerzan al agua a circular a velocidades demasiado altas. En comparación, sus resultados hablan de velocidades bajas y un valor razonable de la *quinaria*: 27,22 m³/día.

El siguiente en comentar el tema, que no en calcularlo, es Lanciani (1870). Para este autor, tras revisar los datos de Rondelet y el trabajo anónimo, concluye que es mucho más razonable el segundo que el primero; sin embargo, opta por afirmar que es necesario un estudio mucho más profundo de la mano de la ingeniería.

Eugene Belgrand (1875) supone un nuevo aporte y un nuevo punto de vista. Para este autor, los trabajos precedentes son erróneos. Desde su perspectiva, la *quinaria* no es una unidad de volumen sino de superficie, y del cálculo que realiza para los diferentes acueductos deduce valores diferentes para la *quinaria*, en concreto se mueve en una horquilla que va desde los 22 y los 61 m³/día.

Para sus cálculos utiliza la formulación de Prony y los datos de Rondelet; los de este último para rechazarlos, afirmando que situar la posible altura del agua sobre el tubo de salida, hipótesis defendida por Rondelet, es pura especulación. En su opinión, lo más razonable es utilizar la altura de las incrustaciones calcáreas, teniendo en cuenta el estiaje, y sobre ellos realizar los cálculos.

Con Herschel (1913), cambiamos de siglo, aunque continuamos viendo los diversos aportes que se realizan por parte de los investigadores. En este caso, el autor norteamericano, con un discurso bastante caústico, somete a todos los autores precedentes a crítica, Prony, según Herschel, no habla de forma categórica, lo hace en condicional; Rondelet obtiene resultados exagerados; tan solo Belgrand le parece razonable. Su razonamiento se basa por un lado en la simpleza del problema, para la época, y por otro en que no se puede hallar un volumen conociendo tan solo la superficie. A pesar de todo realiza un cálculo en el que las estimaciones de máximo y mínimo son tan amplias que en realidad aportan muy poco al debate: 10,79 m³/día y 35 m³/día de máximo son los valores que obtiene para la *quinaria*, partiendo del cálculo de velocidades en las condiciones en que operaban los acueductos romanos.

Desde mi punto de vista, Herschel supone un cambio en varios aspectos. Por una parte, su origen, al otro lado del Atlántico; por otra, su formación y experiencia; y por último, el tono general de su exposición de la que se desprende un cierto tono de superioridad técnica sobre sus colegas europeos.

Claudio Di Fenizio (1916) significa un antes y un después en la investigación del valor de la *quinaria*. Este ingeniero italiano, tras analizar, sobre todo, el trabajo

de Rondelet, del que utiliza la idea de tomar la altura del agua sobre el tubo de salida, afirma que los razonamientos que el autor francés realiza no son correctos, aunque sí su base de partida. Con esta idea elabora su propia teoría, en la que la altura del agua sobre el tubo de cinco sería consecuencia de la necesidad de que el agua cubriera al de mayor diámetro instalado sobre el mismo eje, de donde deduce que esa altura es de 11,5 cm. Con este dato realiza los cálculos utilizando una nueva fórmula, aquella que se basa en la fuerza de la gravedad como elemento de empuje del agua, de manera que asocia la velocidad al valor de la raíz cuadrada de dos veces la constante gravitatoria por la altura de agua sobre el tubo, con este valor y el área se puede obtener el volumen, pero añade además un nuevo factor: el rozamiento que actúa como reductor del volumen. Con estos factores establece un nuevo valor para la *quinaria* 40,6 m³/día.

Decía que este autor italiano supone un punto de inflexión en la investigación, y lo decía porque este valor, con una mínima corrección posterior (Pace, 1983), se convierte en el valor de referencia comúnmente aceptado por la mayor parte de los investigadores que, sin entrar en profundidades, precisan de un valor de conversión.

Una de las razones de su popularidad puede estar en el hecho de que, durante más de cincuenta años, ningún otro investigador se acercará al tema de manera inquisitiva, lo que ha permitido que se asiente en la mayor parte de la literatura histórica posterior, llegando incluso hasta nuestros días, a pesar de que con posterioridad, como puede verse, se han realizado nuevos estudios que contradicen sus resultados.

Con Thomas Asbhy (1935), reputado historiador, podemos comprobar lo que afirmo en el apartado anterior. Para este autor, el valor de la *quinaria* es el calculado por Di Fenizio, y ello a pesar de que su razonamiento científico le indica, como él mismo expone, que con los datos de Frontino en la mano no es fácil determinar velocidades y caudales.

Blackman (1978) es un ingeniero que se enfrenta a la cuestión con renovado interés y, todo hay que decirlo, con escaso eco mediático. Su planteamiento básico parte de la idea de que es necesario entrar en contacto con la realidad de los restos arqueológicos que nos han llegado. Para ello, realiza un estudio sobre el terreno de los cuatro grandes acueductos romanos y, de manera sistemática, toma toda la información que es posible obtener referida a secciones, rugosidad, pendientes, trazados, puntos de toma y de llegada, para con ello elaborar un trabajo, al margen de Frontino, de Di Fenizio y de cualquier otra fuente anterior, que tan sólo tenga en cuenta la información real, con la que poder calcular los caudales que eran capaz de transportar esos acueductos. Su trabajo le lleva a concluir que la capacidad máxima

de transporte sería de 604.800 m³/día, lo que, trasladado al conjunto de los nueve acueductos, significaría un valor de 813.852 m³/día. Puesto que el autor no entra en la polémica del valor de la *quinaria*, no realiza ninguna traslación. Aunque no resulta difícil deducir que el valor medio estaría en 32,81 m³/día.

Como decía anteriormente, los resultados obtenidos por Blackman han tenido poco eco entre los investigadores y su trabajo, aunque aparece referenciado en algunas bibliografías, apenas es considerado en la actualidad como válido.

En mi opinión, la forma en que realiza el estudio, indicando su alcance y sus limitaciones, fijando previamente las bases de partida, analizando los datos utilizando un formato puramente técnico, es digna de ser tenida en cuenta a la hora de realizar una aproximación rigurosa al valor de la *quinaria*.

Al iniciar este trabajo, y ante el abrumador peso de autores foráneos, anunciaba que mi intención era también fijar mi atención en lo que al respecto se había hecho en nuestro país. En esa línea, Carlos Fernández Casado (1983) ha sido un ingeniero de referencia en el estudio de las estructuras romanas en España, y por esa razón ha sido objeto de atención.

El resultado no ha sido muy alentador, a pesar de lo amplio de su trabajo, a pesar de la valiosa información que traslada en los dos textos analizados de este autor, y a pesar de que entre su bibliografía aparece Frontino. Lo cierto es que Fernández Casado no hace referencia alguna a este tema.

Pace (1983) es un ingeniero italiano, experto en cuestiones relacionadas con la antigua Roma, que se aproxima, a través del trabajo de su compatriota Di Fenizio, al tema del valor de la *quinaria*. Para ello, basa su estudio en lo afirmado por este. Dando por correcto su razonamiento, y afinando con una fórmula más actual el cálculo, sus resultados confirman los de Di Fenizio. Con una ligera corrección al alza, estima que el valor de la *quinaria* es de 41,5 m³/día.

De nuevo nos encontramos con un autor muy consultado por los estudiosos. El hecho de que, con su formación de ingeniero, y tras haber transcurrido más de 60 años desde que su colega realizara sus cálculos, reafirme la validez de su trabajo, da más pábulo a todos lo que han mantenido que este es el incontrovertible valor para la *quinaria*.

Desde mi punto de vista, el trabajo de Di Fenizio es coherente, coherente con su tiempo y coherente con sus conocimientos. Sin embargo, el hecho de Pace obvie trabajos existentes y recientes, y que sin duda conoce, como el de Blackman, siembra dudas acerca de su imparcialidad. Podría aducirse que lo ha hecho utilizando formulación más actual y con, prácticamente, el mismo resultado, pero no es menos cierto que en ningún momento cuestiona, siquiera mínimamente, las

bases de partida de Di Fenizio, lo cual resulta impropio de un investigador de su nivel. Mi conclusión es que el hecho de que se trata de un reputado compatriota, ha mermado su capacidad de análisis, optando por no entrar en ningún tipo de debate.

El problema, como veremos más adelante, es que numerosos historiadores, guiados por sus antecedentes, no dudan del valor de sus afirmaciones, aceptando de esta manera que los valores propuestos por Pace son de referencia.

Hodge (1984) se plantea en su libro cómo es posible que Frontino pudiera realmente averiguar los caudales de sus acueductos, dando por bueno que la fórmula más certera es la utilizada por Di Fenizio y sus resultados correctos. Sin embargo, señala que la velocidad es la incógnita que es preciso hallar, puesto que sin ella ningún resultado es válido y, puesto que el autor romano no arroja mucha luz al respecto, no queda sino especular.

El hecho de que los ensayos realizados en canales de laboratorio que menciona en su trabajo no le lleven a ningún resultado categórico no hace más que aumentar sus dudas. A su juicio, concluye, la cuestión sigue abierta, y a la espera de nuevas aportaciones, como ya decía, acepta como válidos los datos del ingeniero italiano.

En Harry Evans (1994) tenemos un ejemplo de historiador que no desea implicarse en la discusión. Desde su punto de vista, Frontino es, de momento, la única referencia utilizable. La unidad que maneja, la *quinaria*, es perfectamente coherente y, por tanto, no es preciso realizar ningún tipo de traslación.

Estamos ante el caso de un historiador que prefiere dedicarse plenamente a su trabajo de investigación, sin tener que recurrir a otras disciplinas, máxime cuando estas son objeto de controversia. En su obra vemos en todo momento cómo se centra en la de Frontino sin más pretensiones que las que se derivan de lo afirmado por el autor romano.

De todos los autores reseñados, Taylor (2000) es el único que basa su trabajo en los cálculos de Blackman, dando plena validez a su estudio y utilizándolo como referencia. Previa explicación del trabajo de este, realiza sus cálculos y determina que el valor de la *quinaria* es de 32 m³/día.

A pesar de lo antedicho, es de destacar el hecho de que previamente Taylor analiza a Di Fenizio, comprueba sus datos y concluye que los valores estimados por el ingeniero italiano son demasiado altos. A partir de ahí, expone el estudio de Blackman y lo considera acertado.

Ya con anterioridad me he referido a la profunda huella que el trabajo de Di Fenicio ha dejado en la historiografía sobre el tema. Taylor sirve de ejemplo: considera que el valor adecuado a utilizar es el que se desprende del trabajo de Blackman, pero no puede sustraerse a comparar los datos de Di Fenicio con los de Blackman. De modo, que no es suficiente con aceptar un determinado valor, sino que es preciso hacerlo teniendo en cuenta los resultados del ingeniero italiano, puesto que son estos resultados los habitualmente aceptados por la comunidad científica.

En este caso nos situamos ante un historiador, es decir, ante alguien que no es experto en hidráulica; alguien que tan sólo se ha limitado a analizar la información disponible para, según su criterio, utilizar la más aceptable. Ello resulta obvio, aunque menos habitual de lo que pensamos.

Rodgers (2004) nos presenta un cuidadoso trabajo de estudio lingüístico de la obra de Frontino. En su análisis pormenorizado del lenguaje utilizado y sus posibles traducciones, este autor no incluye ningún dato sobre el valor de la *quinaria*; se remite a uno de los apéndices de su libro en el que el historiador Christer Bruun da un repaso al concepto y a sus ideas al respecto.

Bruun (2004) da título al apéndice, citado por Rodgers, de forma que su posición queda claramente definida: *Sobre la imposibilidad de conocer el valor exacto de la quinaria*. Con este título deja asentada, a priori, su idea, que desarrolla a lo largo del opúsculo. Y se apoya en los resultados de Di Fenizio y Pace. Para ello, explica el modo en que el primero realizó sus cálculos y la corrección realizada por el segundo. El trabajo de Blackman presenta serias dudas para el historiador, puesto que no ofrece seguridad en lo referido al número de *quinarias* transportadas, y por tanto la traslación no es fiable. En opinión de este historiador, ni siquiera los propios romanos estaban interesados en saber los caudales que transportaban; para ellos era suficiente con que el agua llegara en las cantidades adecuadas.

Bruun es considerado uno de los mayores expertos en este tema, su trabajo es de obligada referencia.

Lo que este autor ofrece es una amplia horquilla de velocidades, basadas siempre en las posibles alturas del agua sobre el tubo de salida; así, desde 10 cm hasta los 16 cm tendríamos valores para la *quinaria* que oscilarían entre los 38 y los 47,3 m³/día. Todo ello utilizando para el cálculo la fórmula empleada por Di Fenizio.

Lo que trata de afirmar este historiador es que siempre nos vamos a mover con valores relativos, de manera que resulta inviable el cálculo de un valor exacto.

En cualquier caso, tenga o no razón Bruun, lo cierto es que todo su aparato lógico es desplegado basándose en los cálculos realizados a través de lo que él mismo denomina la fórmula de Di Fenizio-Pace. Es decir, que acepta como válido el modelo propuesto por los ingenieros italianos.

El último trabajo que reseñamos es el de un ingeniero español, interesado en todo lo relacionado con el mundo romano. Jose Manuel de la Peña Olivas (2010) ofrece en sus trabajos un interesante punto de vista en todo lo relacionado con la conducción de aguas, no sólo con el tema que aquí nos ocupa sino que en general nos muestra un amplia visión del escasamente conocido desarrollo de la ingeniería hidráulica romana.

En lo referido al asunto concreto de la *quinaria*, también De la Peña participa, y lo hace desde su perspectiva de ingeniero, sin entrar en demasiadas complicaciones. Utiliza la fórmula que se emplea en la actualidad para el modelo de canales a lámina abierta, la de Manning. Sobre esta base, y trasladando los datos de pendiente, radio hidráulico y coeficiente de rugosidad, realiza el cálculo. Sus resultados son inusualmente bajos: entre 11 y 18 m³/día.

Lo que sí parece claro, a la vista de sus afirmaciones, es que el autor español considera poco riguroso intentar trasladar el valor de la *quinaria* a valores en metros cúbicos. A pesar de ello, intenta realizar una aproximación, que es la que aparece explicada en su trabajo.

El trabajo de Di Fenizio también aquí ejerce su influencia. De la Peña nombra a dos autores españoles que utilizan el valor calculado por el ingeniero italiano, aunque únicamente para indicar que la traslación es absurda, ya que no es posible tratar de comparar superficies con volúmenes. Así, las primeras corresponderían a los datos de Frontino, y los segundos a nuestro afán de tratar de encontrar un valor de conversión.

Con De la Peña finaliza nuestro recorrido. Los resultados se muestran en la tabla 17, en forma de tabla resumen, con los datos más relevantes de cada autor analizado en este estudio.

Se puede afirmar que la principal diferencia observada, más allá de los resultados concretos de cada trabajo, estriba en la manera de enfocar el problema. Así, se dan dos grandes corrientes, la de aquellos que consideran que el punto de medida se sitúa en los depósitos, y la de quienes consideran que es en los acueductos el lugar donde debe hacerse la medición.

La discrepancia entre ambos criterios de medición se deja sentir en los resultados. Por tanto, si comparamos los valores obtenidos siguiendo uno y otro método tenemos:

INVESTIGADORES QUE TRABAJAN SOBRE LOS ACUEDUCTOS

AUTORES	PROFESIÓN	AÑO	VELOCIDAD DEL AGUA EN m/s	VALOR QUINARIA m ³ /24h.	SUMINISTRO A ROMA EN QUINARIAS/24h.	SUMINISTRO A ROMA m ³ /24h.
Anónimo	Ingeniero	1870	0,74	27,22	24.805,00	675.092,88
Eugene Belgrand	Ingeniero	1875	Variable	22-61	24.805,00	933.000,00
C. Herschel	Ingeniero	1913	0,3-1	10,79-35	14.018,00	318.382,42
Deane R. Blackman	Ingeniero	1978	Variable	32,81	24.805,00	813.852,05
Rabun Taylor	Historiador	2000	Variable	32,00	24.018,00	768.576,00
José Manuel de la Peña Olivas	Ingeniero	2010		11,23-18,14	24.805,00	423.615,48
VALORES PROMEDIO				30,68		655.419,81

Tabla 15. Investigadores que han utilizado los acueductos para medir el caudal.

INVESTIGADORES QUE TRABAJAN SOBRE DEPÓSITOS

AUTORES	PROFESIÓN	AÑO	VELOCIDAD DEL AGUA EN m/s	VALOR QUINARIA m ³ /24h.	SUMINISTRO A ROMA EN QUINARIAS/24h.	SUMINISTRO A ROMA m ³ /24h.
J. P. Rondelet	Arquitecto	1820	1,64	60,00	24.806,00	1.488.360,00
Claudio Di Fenizio	Ingeniero	1916	1,11	40,60	24.806,00	1.007.123,60
Thomas Ashby	Historiador	1935	1,11	41,50	24.360,00	1.010.940,00
Pietrantonio Pace	Historiador	1983	1,273	41,50	24.806,00	1.029.449,00
Trevor Hodge	Historiador	1984	1,273	41,50	24.805,00	1.029.407,50
Christer Bruun	Historiador	2004		indeterminado	24.413,00	N/A

Tabla 16. Investigadores que han utilizado la altura de agua en los depósitos para calcular el caudal.

De estos resultados, se pueden deducir algunas conclusiones:

- La proporción entre ingenieros e historiadores es prácticamente la misma entre los investigadores estudiados.
- Los ingenieros apoyan en mayor proporción la medición sobre los acueductos.
- Los historiadores se inclinan por utilizar el valor de Di Fenizio o de Pace.
- La velocidad del agua considerada es menor cuando se mide en los acueductos.

- Como consecuencia de lo indicado en el punto anterior, el volumen medio de agua que entra a la ciudad varía enormemente entre una propuesta y otra.
- El cálculo de los metros cúbicos, realizado utilizando como punto de medida los depósitos, casi duplica al realizado empleando los acueductos.

A mi modo de ver, se está cayendo en un profundo malentendido, puesto que numerosos investigadores dan por bueno el valor de Di Fenizio, para luego aplicarlo a mediciones en acueductos. Si entendemos que el valor de la *quinaria* es aquel que se deriva del agua que sale a través de un tubo de cinco, adosado a un depósito, con una carga de 11,5 ó 12 cm., entonces no tiene mucho sentido universalizar su valor y emplearlo para cualquier canal del que sólo conocemos la superficie. Sin embargo, si empleamos el valor obtenido con los modelos que reflejan el tránsito del agua a través de un canal a lámina abierta, entonces sí es posible la traslación. Es decir que, a la vista de los resultados, sería preciso reconsiderar el uso de los valores de Di Fenizio, más allá de las condiciones que él mismo propone.

Para el cálculo de valores de caudal en acueductos el valor más razonable es el obtenido por Blackman.

Existe, además, otro apartado que también es objeto de análisis y de posturas encontradas. Me estoy refiriendo al hecho de que si la *quinaria* es una unidad de volumen o una unidad de superficie, cada una de estas posiciones tiene sus valedores y detractores. Herschel (*Vid. supra* 4.6) considera poco menos que descabellado intentar hallar un volumen conociendo solo su superficie; De la Peña (*Vid. supra* 4.17) deja claro que se trata, en su opinión, de una unidad de superficie, por el contrario, Di Fenizio (*Vid. supra* 4.7), Pace (*Vid. supra* 4.11) o Bruun (*Vid. supra* 4.16) dan por sentado que es una unidad de volumen.

En mi opinión, creo que lo que debemos hacer es utilizar a Frontino. Él es la fuente. Si nos dejamos llevar por aspectos de ingeniería, ajenos en este caso al estudio de la información contenida en su informe, estaremos entrando en una dinámica que nos conduce directamente a este tipo de interpretaciones.

Para Frontino no cabe la menor duda. Su relato habla de capacidad de absorción “*capacitas adparet*” (Frontino, 1985: 27). En esa línea, la *quinaria* es definida como capacidad, y una medida de capacidad es una medida de volumen, aunque la referenciamos por su sección.

Al finalizar su exposición sobre la distribución del agua, el autor romano concluye:

“Haec copia aquarum ad Neruam imperatorem usque computata ad hunc modum discribatur” (Frontin. *Aq.*, LXXXVII).

“Este era el volumen de agua que hasta el gobierno de Nerva se había calculado y distribuido según el método expuesto” (Frontino, 1985: 59).

Si entendemos que “*copia aquarum*” no tiene otra traducción que la de “volumen de agua”, no podemos más que reafirmar que el concepto que el romano nos traslada no es de superficie sino de volumen.

TABLA RESUMEN DE AUTORES SECUNDARIOS Y DATOS OBTENIDOS PARA EL ESTUDIO DE LA QUINARIA DE FRONTINO. ORDEN CRONOLÓGICO									
AUTORES	PROFESIÓN	AÑO	FORMATO TEXTO ORIGINAL	FÓRMULA EMPLEADA	VELOCIDAD DEL AGUA En m/s	VALOR QUINARIA m ³ /24h.	SUMINISTRO A ROMA EN QUINARIAS/24h.	SUMINISTRO A ROMA m ³ /24h.	
Baron de Pirony (Gaspard Riche)	Ingeniero	1817	Libro	$Q=0.64D^2$ $0.64 A / A'$	1.54	56.00	14.010.00	765.008.00	
J. F. Rondélet	Arquitecto	1820	Libro	Razonamiento empírico	1.64	60.00	24.800.00	1.488.360.00	
Andronno	Ingeniero	1870	Libro	$V=63.25 \times SQRT((A^4)(L^4-2H^4) \times I)$	0.74	27.22	24.800.00	675.092.88	
Rondélet Larcen	Arquitecto	1870	Libro	No toma partido (entre Rondélet y Andronno)	N/A	N/A	24.805.00	N/A	
Eugène Belgrand	Ingeniero	1875	Libro	Razonamiento empírico	Variable	22.61	24.805.00	933.000.00	
C. Herschell	Ingeniero	1913	Libro	Razonamiento empírico	0.3-1	10.79-35	14.018.00	318.382.42	
Claudio Di Fazio	Ingeniero	1916	Artículo revista	$Q_{imp} A \sqrt{2g}$	1.11	40.60	24.806.00	1.007.123.60	
Thomas Aubry	Ingeniero	1935	Libro	Ver Di Fazio	1.11	41.50	24.360.00	1.010.940.00	
Diane R. Blackman	Ingeniero	1978	Artículo revista	Medición sobre el terreno	Variable	32.81	24.805.00	813.852.05	
Celso Fernández Casado	Ingeniero	1983	Libro	No aporrea ningún dato	N/A	N/A	N/A	N/A	
Pararomno Pace	Ingeniero	1983	Libro	$V = X \sqrt{R/I}$	1.273	41.50	24.806.00	1.029.449.00	
Trevor Hodge	Ingeniero	1984	Libro	Ver Di Fazio	1.273	41.50	24.805.00	1.029.407.50	
Henry Evans	Ingeniero	1984	Libro	No traduce	N/A	Indeterminado	10.400.00	N/A	
Richard Taylor	Ingeniero	2000	Libro	Ver Blackman	Variable	32.00	24.018.00	768.578.00	
R. H. Rodgers	Ingeniero	2004	Libro	Ver Brian	32.00	24.010.00		768.578.00	
Christie Brian	Ingeniero	2004	Apéndice de libro	Ver Di Fazio o Pace	Indeterminado	24.413.00		N/A	
José Manuel de la Peña Olivas	Ingeniero	2010	Forma de compendio	$Q = \frac{S}{n} R_{m,1}^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_0}$	<0.5	11.23-18.14	24.800.00	423.815.48	

Tabla 17. Resumen de autores secundarios y datos obtenidos para el estudio de la quinaria de Frontino. Orden cronológico.

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo, 1870. *Brevi notizie sull-Acqua Pia Antica Marcia*. Tipografia di F. Cuggiani E. C., Roma.
- Ashby, T., 1935. *The acueducts of Ancient Rome*, (I. A. Richmond, Ed.). Oxford University Press, Oxford.
- Belgrand, E., 1875. *Les Travaux souterrains de Paris*. Dunop Editeur, París.
- Blackman, D. R., 1978. "The Volume of Water Delivered by the Four Great Aqueducts of Rome". *Papers of the Bristish School at Rome*, 46, pp. 55-72.
- Bruun, C., 2004. "The impossibility of reaching an exact value for the roman quinary measure. Appendix C". En R. H. RODGERS. *Frontinus, de aquaeductu urbis romae*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- De la Peña, J. M., 2010. "Sistemas romanos de abastecimiento de agua. Las Técnicas y las Construcciones en la ingeniería romana". *V congreso de las Obras Públicas romanas*. Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas, Madrid.
- De Prony, M., 1816. *Sur le rapport de la mesure appelée pouce de fontainier avec l'once d'eau romaine moderne, et le quinaire antique; et sur la détermination d'une nouvelle unité de mesure, pour la distribution des eaux, adaptée au système métrique français*. Lu à L'Académie Royale des Sciences, Paris.
- Di Fenizio, C., 1930. "Nuova Appendice allo de la portata degli antichi acquedotti Romani e determinazione della quinary". *Giornale del Genio Civile*. Roma.
- Di Fenizio, C., 1937. "Sul ragguaglio dell'antico piede romano al nostro metro e sulle conseguenti misure di superficie di volume e peso". *Giornale del Genio Civile* (XV). Roma.
- Di Fenizio, C., 1916. "Sulla portata degli antichi acquedotti romani e determinazione della Quinary". *Giornale del Genio Civile*. Roma.
- Di Fenizio, C., 1931. "Sulla ubicazione della piscina dell'acquedotto Marcio e sulla misura di portata in essa eseguita da Frontino". *Giornale del Genio Civile* (A. IX). Roma.
- Evans, H., 1994. *Water distibution in Ancient Rome. The evidence of Frontinus*. University of Michigan Press, U.S.A.
- Fernández Casado, C., 1972 (2ª Edic. 2008). *Acueductos romanos en España*. Editorial Doce Calles, Madrid.

- Fernández Casado, C., 1983. *Ingeniería hidráulica romana*. Ediciones Turner, Madrid.
- Frontino, S. J., 1985. *De aqvadvctv vrbis Romae*. (González Rolán, T., Trad.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- González Tascón, I., & Vázquez de la Cueva, A., 1994. “Estudio técnico sobre la conducción de aguas a Caesaraugusta”. En J. A. FERNÁNDEZ. *El acueducto romano de Caesaraugusta, según el manuscrito de Juan Antonio Fernández (1752-1814)*. CEHOPU, CEDEX (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente), Zaragoza.
- Herschel, C., 1899 (2ª edic. 1913). *The two books of the water supply of the city of Rome of Sextus Julius Frontinus*. Logman, Green and Company, Boston.
- Hodge, T., 1984. “How did Frontinus measure the quinaria?” *American Journal of Archaeology*, 88 (2), pp. 205-216.
- Lanciani, R., 1850. *Topografía di Roma Antica. E comentarii di Frontino intorno le acqve e gli aqvedotti* (Vol. IV). Real Accademia dei Lincei, Roma.
- Lomas Salmonte, F. J., 2009. “El abastecimiento urbano del agua en la antigüedad romana. Una introducción”. En L. G. Lagóstena, & F. Zuleta. *La captación, los usos y la administración del agua en Baetica: Estudios sobre el abastecimiento hídrico en comunidades cívicas del conventus gaditanus*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, Cádiz.
- Mays, L. W. (Ed.), 2010. *Ancient Water Technologies*. Springer Science+Business B.V., Tempe, USA.
- Mays, L. W., (Ed.), 2004. *Urban water infrastructure. A historical perspective*. McGraw-Hill, Tampa, Arizona, USA.
- Pace, P., 1983. *Gli Acquedotti di Roma e il de aquaducto di Frontino*. Art Studio S. Eligio, Roma.
- Plinio, C., 2002. *Historia Natural. Libros VIII, IX, X, XI, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI y XXXII*. (J. Cantó, I. Gómez, S. González, E. Tarrío, Eds.; J. Cantó, I. Gómez, S. González, & E. Tarrío, Trans.). Ediciones Cátedra, Madrid.
- Rodgers, R. H., 2004. *Frontinus: De aquaeductu urbis Romae*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rondelet, J. B., 1820. *Commentaire de S. J. Frontin sur les aqueducs de Rome*. Paris.
- Taylor, R., 2000. *Public Needs and Private pleasures. Water Distribution, the Tiber River and the Unban development of ancient Rome*. L’erma di Bretschneider, Roma.
- Ventura, A., 1995. *El abastecimiento de agua a la Córdoba romana II*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Vitrubio, M., 2000. *Los diez libros de arquitectura*. (A. Blázquez, Trad.). Editorial Iberia, Barcelona.

WEBGRAFÍA

<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015032881370;view=1up;seq=1> (2-11-2019)

http://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=hYIVIENKMD4C&oi=fnd&pg=PR13&dq=water+supply+rome+quinaria&ots=QEO3iSAawh&sig=mwjIZfbyMSgZQN Sggd_K4wC6aqs#v=onepage&q=water%20supply%20rome%20quinaria&f=false (2-11-2019)

http://books.google.es/books?id=gLKHZSEHjBkC&printsec=frontcover&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (2-11-2019)

<http://books.google.es/books?id=om744tAuDZQC&printsec=frontcover&dq=Rabun+T aylor&hl=es&sa=X&ei=tlegU97xFvOZ0AX9zYG4Dw&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=Rabun%20Taylor&f=false> (2-11-2019)

http://books.google.es/books?id=rqMGZr4yAkQC&pg=PA37&lpg=PA37&dq=Fahlbus ch+quinaria&source=bl&ots=Z5vC0KAq_w&sig=gDUR8Ew9cmT_SRaKk-1jknR4 fHM&hl=es&sa=X&ei=cvm4U6KUBISl0AWXIYDwDg&ved=0CFAQ6AEwBg#v=onepage&q&f=false (2-11-2019)

<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8501339&fileId=S0068246200011417> (2-11-2019)

<http://mavensnotebook.com/wp-content/uploads/2013/02/Frontinus-Herschel.pdf> (2-11-2019)

<http://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupname?key=Herschel%2C%20Clemens%2C%201842-1930> (2-11-2019)

http://penelope.uchicago.edu/~grout/encyclopaedia_romana/romanforum/quinaria.html (2-11-2019)

http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Pliny_the_Elder/home.html (2-11-2019)

http://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Frontinus/De_Aquis/text*.html (2-11-2019)

http://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Vitruvius/8*.html (2-11-2019)

<http://quod.lib.umich.edu/g/genpub/acu4104.0001.001/46?page=root;size=100;view=image> (2-11-2019)

<http://remacle.org/bloodwolf/erudits/heron/diopetre.htm> (2-11-2019)

http://www.historia-del-arte-erotico.com/Plinio_el_viejo/index.htm (2-11-2019)

<http://www.jstor.org/discover/10.2307/40310747?uid=3737952&uid=2134&uid=2&uid=70&uid=4&sid=21104585983313> (2-11-2019)

http://www.traianvs.net/pdfs/2010_10_delapena.pdf (2-11-2019)

<http://www.waterhistory.org/histories/rome/> (2-11-2019)

<http://www3.iath.virginia.edu/waters/first.html> (2-11-2019)

<http://www3.iath.virginia.edu/waters/primary.html> (2-11-2019)

<https://archive.org/details/leseauxintroduc00belg> (2-11-2019)

<https://archive.org/stream/topografiadirom00lancgoog#page/n327/mode/1up> (2-11-2019)

<https://play.google.com/books/reader?id=QzvAx5KLiUkC&printsec=frontcover&output=reader&authuser=0&hl=es&pg=GBS.PR20> (2-11-2019)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los datos extraídos por Prony (De Prony, 1816: 451).....	32
Tabla 2. Resumen de caudales y sus correspondientes logaritmos (De Prony, 1816: 453)	34
Tabla 3. Ampliada (columnas en fondo azul) sobre la realizada por Prony por el autor de este estudio.....	36
Tabla 4. Resumen de cálculo. (Rondelet, 1820: xxvii)	38
Tabla 5. Elaborada por el autor del trabajo sobre la Tabla 4, ampliada.	39
Tabla 6. Valores en quinarias y metros cúbicos (Belgrand, 1875: 94).....	46
Tabla 7. Estimación de caudales según las alturas de las incrustaciones (Belgrand, 1875: 98).....	48
Tabla 8. Valores estimados en m ³ /día para la quinaria según el acueducto (Belgrand, 1875: 98).....	48
Tabla 9. Secciones comparativas de los distintos diámetros de tubería, desde un eje común (Belgrand, 1875: 100)	50
Tabla 10. Conversión unidades (Herschel, 1899 (2ª edic. 1913): 212).....	54
Tabla 11. Secciones comparativas de los distintos diámetros de tubería, desde un eje común (Belgrand, 1875). Este modelo de Belgrand es el que utiliza Di Fenizio como referencia, de manera que, desde el eje central común hasta la clave del mayor, la diferencia es de 11,5 cm.	58
Tabla 12. Cálculo de caudales (Ashby, 1935: 30). Téputa no aparece en su relación (445 (Fronti., Aq., LXVIII)).....	60
Tabla 13. Cálculo de caudales (De la Peña, 2010: 255).....	77
Tabla 14. Completada con valores de la quinaria en m ³ /día, resultados de quinaria en m ³ /día y suministro total a la ciudad de Roma (fondo azul) sobre la original de De la Peña.	78

Tabla 15. Investigadores que han utilizado los acueductos para medir el caudal.....	89
Tabla 16. Investigadores que han utilizado la altura de agua en los depósitos para calcular el caudal.....	89
Tabla 17. Resumen de autores secundarios y datos obtenidos para el estudio de la <i>quinaria</i> de Frontino. Orden cronológico	92

