

© Isaac Moreno Gallo

Ingeniero técnico de Obras Públicas.  
Mº de Fomento. Dirección General de Carreteras.  
Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón  
isaacmg@wanadoo.es

Publicado en:

## Nuevos Elementos de Ingeniería Romana

III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Astorga 2006  
Junta de Castilla y León - Colegio de Ingenieros T. de O. P.  
TRAIANVS © 2006 - <http://traianus.rediris.es>

Los técnicos romanos ordenaban el territorio con precisión, sobre él construían grandes obras públicas, llegaban a trazar largas alineaciones rectas de decenas de kilómetros para sus carreteras y parcelaban extensiones con una cuadrícula exterior exacta geoméricamente y de enorme magnitud.

Pero, todas estas labores, requerían de un replanteo previo de gran alcance y precisión. Quienes conocen hoy el arte de la topografía saben perfectamente que estas proezas kilométricas no son posibles sin una buena triangulación previa del terreno. Nunca hubieran existido de otra manera.

Establecer vértices geodésicos en lugares prominentes y bien medidos, a los que se pueda referenciar las alineaciones y sus ángulos, es absolutamente necesario para trazar rectas de precisión entre dos ciudades que en ocasiones superan los 50 km<sup>1</sup>, o centuriaciones de 80 km de lado<sup>2</sup>, o mapas de precisión a escala perfecta de grandes extensiones de terreno<sup>3</sup>.

Sabemos que disponían de técnicas avanzadas de topografía y de conocimientos trigonométricos suficientes para hacerlo<sup>4</sup> pero, además, los romanos necesitaban instrumentos adecuados y precisos que se lo permitieran y para ello es imprescindible uno en concreto que conjugase la medición horizontal de ángulos con movimientos verticales de la alidada de visualización.

# Dioptra

Tenemos referencias de la existencia de un instrumento parecido por Herón de Alejandría en su descripción de “la Dioptra”. No es el único autor clásico que la menciona pero sí quien aporta más datos sobre su forma.

Incluso, existen propuestas de reconstrucción gráfica de este instrumento realizadas, normalmente, por gentes de letras, traductores que trabajaron sobre el manuscrito de Herón en griego.

Nosotros, aquí, queremos repasar brevemente los intentos de reconstrucción y propondremos un instrumento que, ajustado a lo descrito en los textos clásicos existentes, funcione.

## 1. Historia de la investigación

Enumeraremos en orden cronológico los principales trabajos conocidos que se han encargado del manuscrito de Herón de Alejandría sobre la dioptra, casi todos ellos con una propuesta de reconstrucción del aparato.

En el siglo XIX, tres autores se ocupan del tema: Venturi en 1814<sup>5</sup>, Vincent en 1858<sup>6</sup> y Schöne en 1898<sup>7</sup>.

Más tarde, el propio Schöne, en 1903<sup>8</sup>, profundiza en el estudio de la dioptra. Drachmann en 1935<sup>9</sup>, 1954<sup>10</sup> y 1968<sup>11</sup>, sigue la estela de los autores anteriores con nuevas propuestas y estudios y Adam hace la suya propia en 1982<sup>12</sup>.

<sup>1</sup> Vía Aurelia, entre *Forum Aurelii* (Montalto di Castro) y *Centum Cellae* (Civitavecchia), con 55 kilómetros de alineación perfectamente recta.

<sup>2</sup> La de Bolonia (Italia), siguiendo la *Via Aemilia*, hacia el oeste.

<sup>3</sup> DECRAMER, L.R. et al. 2003. Le cadastre romain d'Orange. *Archéologia* n° 404 du 01/10/2003, pp. 36-46.

Provence : Une étude récente du cadastre de la colonie romaine d'Orange a permis de superposer ce document cartographique unique au paysage actuel. Le génie des géomètres romains et leur héritage y transparaissent toujours, après presque deux millénaires d'oubli.

<sup>4</sup> MORENO GALLO, I. 2004, pp. 25-68: *Topografía Romana*. III Congreso Europeo Obras Públicas Romanas. Tarragona, octubre de 2004. Libro de Ponencias. Tarragona.

<sup>5</sup> VENTURI, G. B. 1814, pp. 82-147: *Comentari sopra la storia e le teorie dell' ottica*, II, Bologna, 2ª parte: Erone il mecánico, del traguardo.

<sup>6</sup> VINCENT, A. J. H. 1858, pp. 1-181 : *Le traité de la Dioptre par Héron d'Alexandrie*. Notices et extraits des manuscrits de la Bibliothèque Nationale, XIX, 2ª partie. Paris.

<sup>7</sup> SCHÖNE, H. 1898, pp. 432-447 : *Ueber den Mynascodex des griechischen Kriegsschrifsteller in der Pariser Nationalbibliothek*.

<sup>8</sup> SCHÖNE, H. 1903: *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia*, vol II, Dioptra. Lipzig.

<sup>9</sup> DRACHMANN, A. G. 1935 : s.v. *dioptra*, RE Suppl. VI, col 1287-1290

<sup>10</sup> DRACHMANN, A. G. 1954, pp. 609-612 : *Hero's Dioptra and Levelling-instrument*. C. Singer, E.S. Holmyard et A. Hali (Eds). A History of Technology, t. 3.

<sup>11</sup> DRACHMANN, A. G. 1969, pp. 241-247: *A Detail of Heron's Dioptra*. *Centaurus*, n° 3-4.

<sup>12</sup> ADAM, J. P. 1982, pp. 1003-1029 : *Groma et Chorobate*. MEFRA, 94.

ISAAC MORENO GALLO

Fig. 1. Reconstrucción gráfica de la dioptra, por Venturi, en 1814.

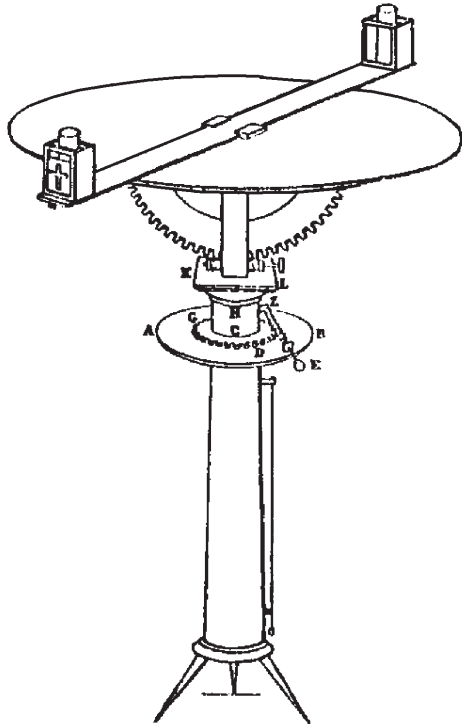


Fig. 2. Dioptra de Vincent, en 1858.

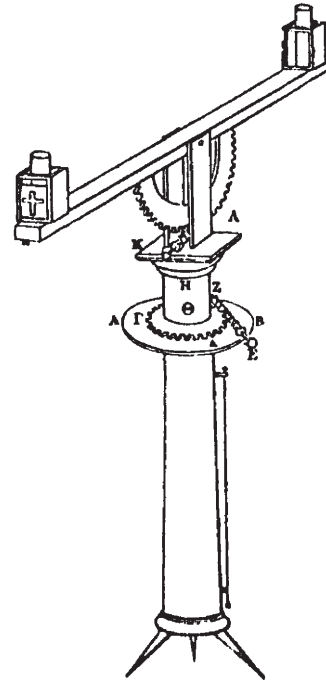
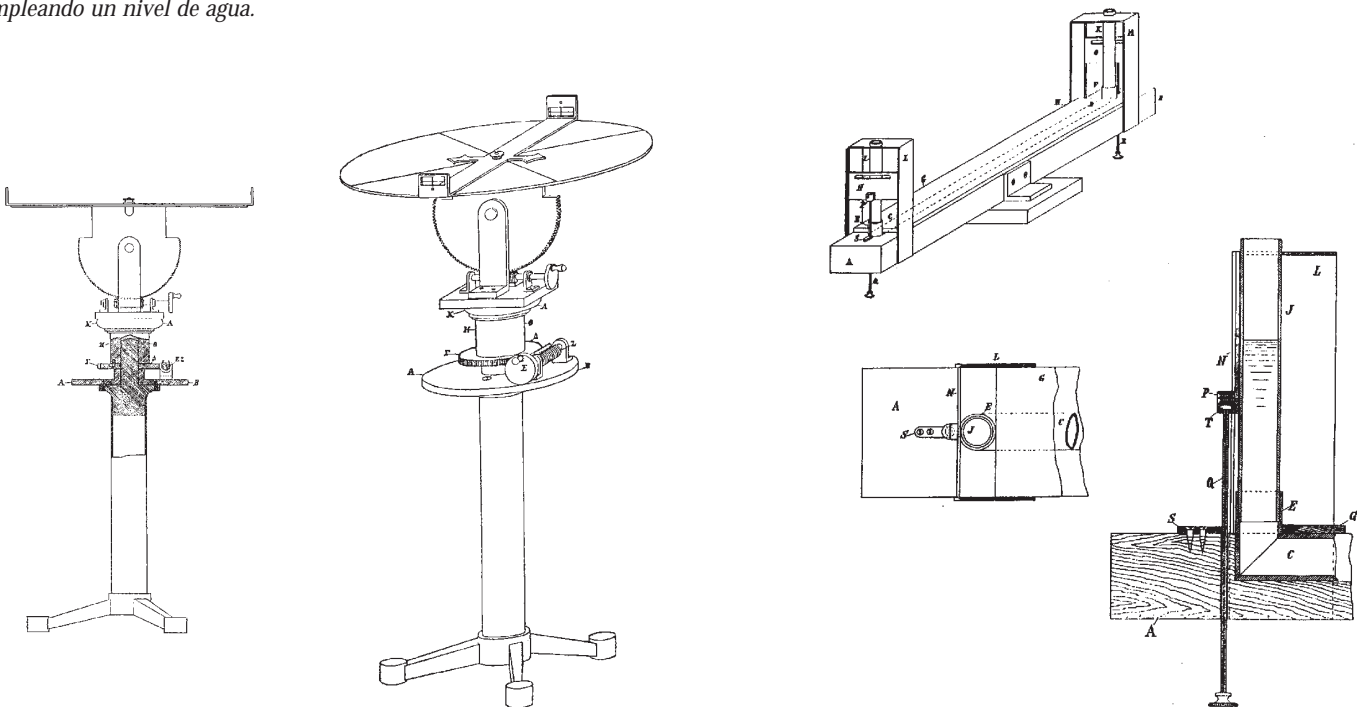
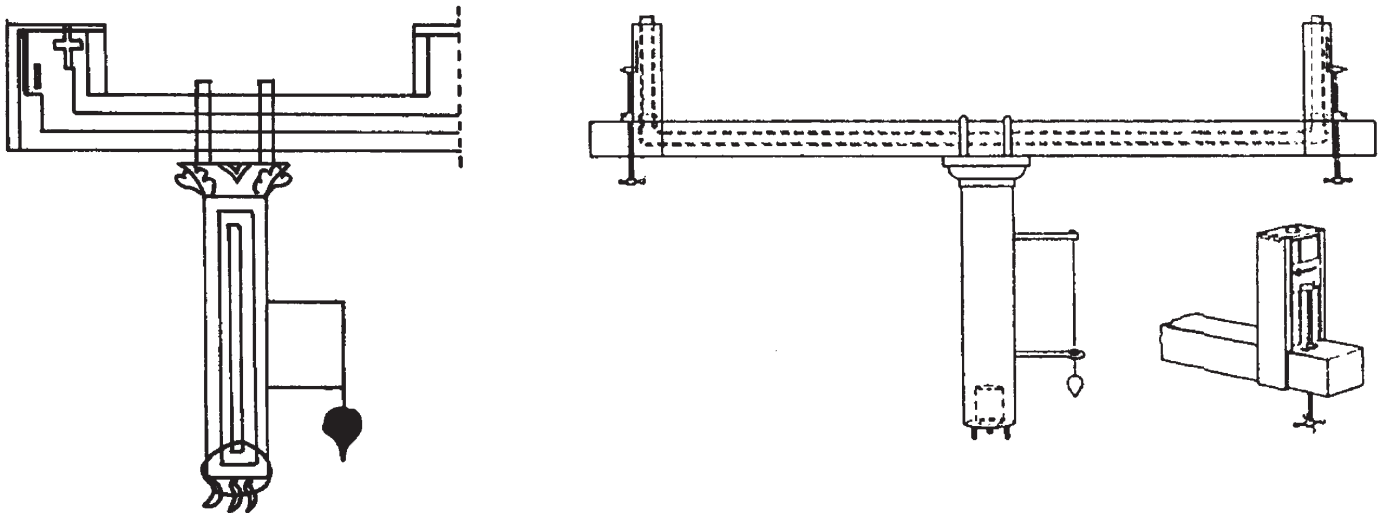


Fig. 3. Reconstrucción de la dioptra por Schöne en 1903, en sus dos modalidades. A la izquierda como teodolito y a la derecha como nivel, empleando un nivel de agua.



Dioptra

Fig. 4. Drachmann, 1954: Reconstrucción de la dioptra en su función de nivel, basándose en la descripción de Herón y en uno de los gráficos parcialmente conservados en el manuscrito de París (a la izquierda).



Interpretando lo dicho por Herón, estos autores, proponen cada uno su reconstrucción insertando los elementos básicos mencionados por Herón allí donde piensan que pueden ser útiles. Probablemente los primeros autores inspiraron a los siguientes que trataron de perfeccionar algunos aspectos.

Schöne restituye por primera vez dos modelos diferenciados mencionados por Herón. Uno, con función de nivel, auxiliado por un nivel de agua, que ya habían propuesto en parte Venturi y Vincent y otro con función de teodolito.

Respecto a la utilidad práctica de estos modelos en las precisas labores de topografía que evidentemente requirieron los técnicos romanos, ya que fueron imprescindibles para muchas de sus proezas en la obra pública, cabe hacer aquí un escueto análisis de cada uno de estos modelos.

- **Venturi (1814):** En su modelo es imposible estacionar el aparato en un plano horizontal estable a los giros sobre el eje vertical del aparato. Es decir, el semicírculo vertical bajo el disco horizontal no permite mantener un plano horizontal cuando se gira sobre el eje vertical del aparato.

No admite mediciones angulares en el plano vertical. El propio nivel de agua lo impide por su propia estructura funcional. Por tanto, el aparato en sí, no es funcional.

- **Vincent (1858):** Es imposible estacionar el aparato en un plano horizontal estable a los giros. No

dispone de medición de ángulos horizontales ni verticales. Aún teniendo habilitado un nivel de agua, la nivelación no se mantiene en los giros al no estar dotado de mecanismos de estacionamiento fiables. El aparato no es funcional.

- **Schöne (1903):** En la versión tipo teodolito, es imposible estacionar el aparato en un plano horizontal estable a los giros. El semicírculo vertical bajo el disco horizontal no permite mantener un plano horizontal cuando se gira sobre el eje vertical del aparato.

La versión tipo nivel, podría funcionar sobre una plataforma nivelada que mantuviera el nivel en los giros sobre el eje vertical del aparato. Schöne, sin embargo, no propone un apoyo avanzado de este tipo en su reconstrucción del nivel.

- **Drachmann (1954):** Su nivel podría funcionar si, estando bien construido, pudiera estacionarse en el plano horizontal sin dificultad y en cualquier tipo de terreno.

Sin embargo, el pie que propone, adaptado en exceso al dibujo esquemático del manuscrito de París, no admite la posibilidad de fácil estacionamiento en terrenos irregulares. Este problema es idéntico a todos los modelos anteriores que inexplicablemente ignoran mecanismos tan sencillos, eficaces y forzosamente antiguos, como el trípode.

## ISAAC MORENO GALLO

- **Adam (1982):** Su diseño incluye un trípode, pero serían necesarios mecanismos más fiables de estacionamiento y la consecución de un plano horizontal estable a los giros. No dispone de medición angular en el plano vertical y el pequeño diámetro del disco horizontal no es capaz de mediciones de precisión.

Recientemente, un interesante trabajo sobre el manuscrito de Herón, sobre lo descrito en él y sobre lo dicho por anteriores autores, lo realiza Marie Feyel en 1999<sup>13</sup>. Su análisis del texto a partir de la traducción de Schöne es minucioso y bien estructurado. Decide no proponer ninguna reconstrucción del aparato, considerando escasamente fiables los intentos anteriores y difíciles de completar debido a la laguna del texto de Herón provocada por la desaparición de varios folios en el cuerpo central de la descripción de la dioptra.

Por último, Lewis en 2001<sup>14</sup>, en su obra dedicada a los instrumentos topográficos antiguos, construye y ensaya un sencillo prototipo, con un solo disco y una regla giratoria que presenta los mismos problemas mencionados en los ensayados anteriormente.

En definitiva, la traducción de los textos clásicos nos ha permitido hasta ahora saber claramente que el aparato existió y que se usaba para diversas operaciones de medición, replanteo topográfico o simple visualización terrestre. Herón también alude al uso de la dioptra en labores astronómicas.

Gracias a Herón y en parte a Polibio, podemos saber como eran algunas de las piezas que la componían y su aspecto aproximado, a partir de ello se han intentado las reconstrucciones mencionadas, sin embargo, no nos consta que técnicos cualificados en el arte de la topografía se hayan ocupado nunca de una reconstrucción de la dioptra.

## 2. Las fuentes

De nuevo, como hicimos con el corobate en nuestra reconstrucción de 2004<sup>15</sup>, tras examinar las reconstrucciones hasta hoy propuestas, se nos ha ocurrido prioritario volver a las fuentes para intentar interpretar lo que realmente se decía del aparato en cuestión.

Los romanos tenían con toda seguridad un teodolito que funcionaba perfectamente porque sus obras lo certifican,

sin embargo, las reconstrucciones no se corresponden ni de lejos con esta definición.

Examinemos por tanto lo que nos cuentan los poquísimos textos clásicos que los transcriptoros, casi nunca latinos, se han dignado en transmitirnos, cosa común en lo que se refiere a las transcripciones de textos científicos de aquella civilización en los que factores poco tratados han debido cebarse especialmente.

### 2.1 HERÓN DE ALEJANDRÍA

En contra de lo que se pensó mucho tiempo, Herón vivió en nuestra era, más probablemente que en la anterior. Sus observaciones sobre un eclipse de sol hacia el año 62 d.C., así lo confirman<sup>16</sup>.

Fue uno de los sabios de la antigüedad que dedicó su estudio a ciencias como las matemáticas aplicadas, la mecánica, la física, la geodesia, la logística y el cálculo numérico. Solo algunos retales de todo esto han llegado hasta nosotros.

Inventó máquinas de vapor, autómatas y diversas máquinas de guerra, tal como ballestas y catapultas de largo alcance.

Un trabajo crucial suyo que nos interesa tratar aquí es el de “La Dioptra”. Existe en manuscrito en la Biblioteca Real en Viena, otro en la Biblioteca de la Universidad Estrasburgo y otro, el más estudiado, en la Biblioteca Nacional de París.

En él nos explica las partes del instrumento y su utilidad. Claramente nos describe dos versiones distintas del mismo, cada una con una función. Una de ellas con la función de nivel y otra con al función de teodolito.

Primero describe la parte de apoyo del instrumento o parte inmóvil común a ambas versiones. Habla de una columna de sujeción rematada arriba en forma de capitel y de la presencia de tres tetones que probablemente se tratasen de dispositivos (tornillos) de nivelación. También menciona un tornillo que permite girar sobre el eje vertical a la parte superior del instrumento.

La imprecisión sobre la forma en que esta pieza debía apoyarse en el suelo, no resuelve la incógnita principal de su función e impide saber la altura y dimensiones finales de ella. Nosotros hemos elegido como opción el empleo de un

<sup>13</sup> FEYEL, M. 2001, pp. 190-225 : *Comment restituer la Dioptre d’Héron d’Alexandrie*. Autour de la Dioptre d’Héron d’Alexandrie. Centre Jean-Palmerne. Université de Saint-Étienne.

<sup>14</sup> LEWIS, M. J. T. 2001, pp. 51-53: *Surveying instruments of Greece and Rome*. Cambridge University Press.

<sup>15</sup> MORENO GALLO, I. 2004, pp. 43-49: *Topografía Romana*. ob. cit.

<sup>16</sup> NEUGEBAUER. 1938: *Ubre eine Methode zur Distanzbestimmung Alexandria-Rom bei Heron*. Copenhague.

Dioptra

trípode elemental de sujeción sobre el que hemos dispuesto una base nivelante de tres tornillos, universalmente utilizada en este tipo de instrumentos topográficos desde época remota.

Es decir, como ignoramos la forma exacta de la parte inmóvil descrita por Herón y la forma en que ayudaba al estacionamiento final del aparato, hemos elegido una que de cualquier forma lo haga bien.

La versión correspondiente a un aparato de nivelación, provista para ello de un nivel de agua, es bastante sencilla de reconstruir y precisamente se conserva su descripción completa en el manuscrito.

Cualquiera de las reconstrucciones propuestas por Schöne o Drachmann estacionada sobre un trípode y un plato bien nivelado servirá para ser utilizado como aparato de nivelación.

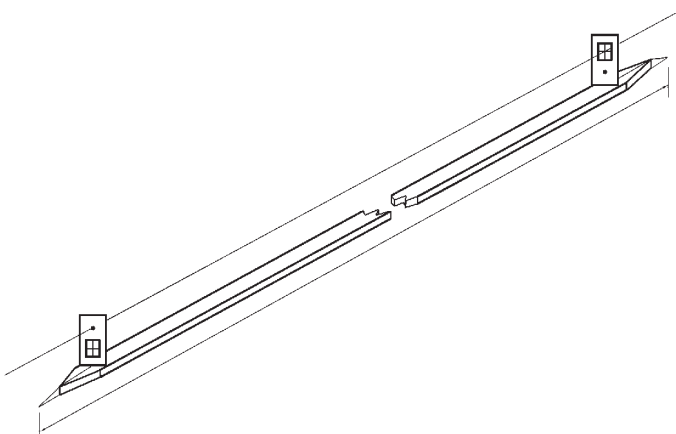
Bien es cierto que este tipo de nivel no alcanzaba la precisión requerida para las grandes obras de conducción de las aguas. Sabemos esto con exactitud, gracias a la taxativa afirmación en este sentido de **Vitrúvio**<sup>17</sup> cuando nos dice que debe recurrirse al corobate para estas labores.

Más difícil de saber es lo que Herón explicaba sobre la dioptra en los folios perdidos de su manuscrito, todos ellos correspondientes a la versión de la dioptra con función de teodolito. Pero, por los folios supervivientes, sabemos de la forma de esta versión del instrumento y de las piezas que lo componían.

Principalmente, cabe resaltar la presencia de:

- *Un remate del apoyo en forma de un capitel dórico.* Tal vez como apoyo amplio de la parte móvil, aunque más adorno que otra cosa.
- *Un disco horizontal graduado* (limbo horizontal) movable con tornillo y engranaje.
- *Un semicírculo vertical.* En nuestra opinión el soporte del limbo vertical.
- *Una regla móvil con visores.* Seguramente una alidada de pínulas.

Fig. 5. Regla con alidada de pínulas.



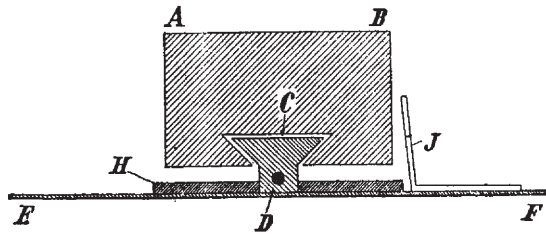
Para esta misma versión existían otras formas de construcción de la alidada de visualización del instrumento, como veremos más adelante, citadas por autores como Hiparco y Polibio.

Más adelante, Herón, describe una regla de mira graduada de sencilla pero eficaz factura, como complemento para la realización de muchas de las mediciones llevadas a cabo con la dioptra.

Y finalmente, pasa a enumerar los usos para los que la dioptra está pensada, como el levantamiento de planos, nivelaciones, mediciones de campos sin necesidad de entrar en ellos, medir ángulos, hallar el área de un triángulo, atravesar una montaña siguiendo la línea recta, medir distancias y alturas de lugares inaccesibles, etc.

<sup>17</sup> VITRUVIO: *De Architectura libri decem*, liber VIII, cap. V, 1: Trataré ahora de los métodos de conducir el agua a las viviendas y a las ciudadelas. En primer lugar se ha de hacer el nivelado. Se puede nivelar con dioptras, con niveles de agua o con un corobate, pero se hace con mayor precisión por medio del corobate, porque las dioptras y los niveles fallan.

Fig. 6. Regla de mira graduada descrita por Herón y reconstruida por Schöne en 1903.

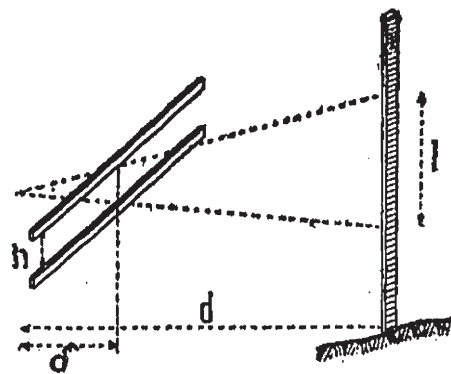
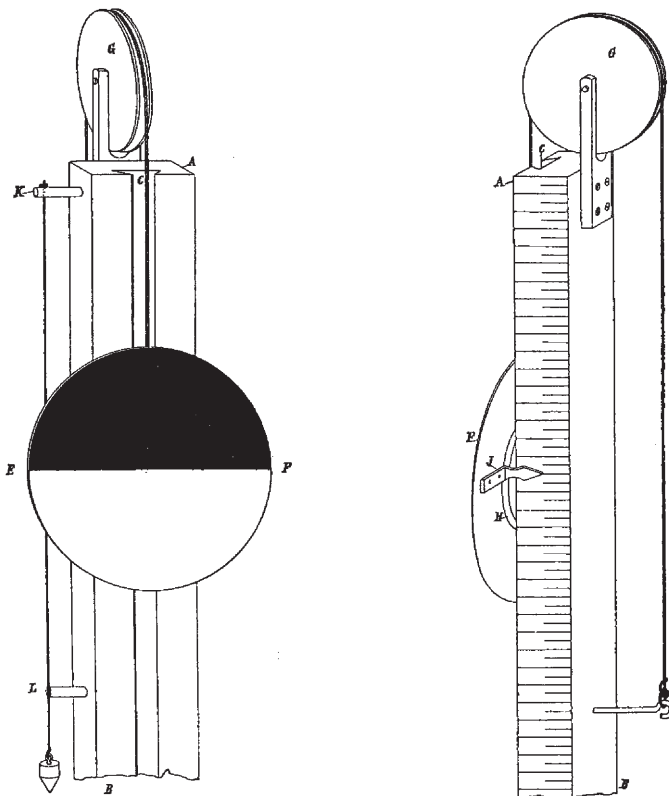


## 2.2 HIPARCO

Este geómetra de la antigüedad (190 - 120 a.C.) fue la persona que más influyó sobre Ptolomeo y casi todo lo que sabemos de Hiparco proviene del *Almagesto* de Claudio Ptolomeo.

Sabemos que manejó una dioptra que tenía uno de los visores deslizantes sobre la regla. Este mecanismo confiere una potencia y utilidad especial a la alidada ya que permite calcular indirectamente distancias horizontales mediante métodos estadimétricos.

Fig. 7. Fundamento de la estadía  $d/l = d/h$



No obstante, no creemos que esta fuera una variante de la dioptra de uso común, ya que la precisión que aporta no es importante, se reduce a cortas distancias y requiere un esmerado grado de construcción.

## 2.3 POLIBIO

Historiador griego (200 a.C. - 118 a.C.). Realizó numerosos viajes a Hispania, Galia y África, y acompañó a Escipión en los sitios de Cartago (146 a.C.) y de Numancia (133 a.C.). Solo se conserva parte de su obra, que se tiene por rigurosa y basada en el conocimiento preciso de los hechos y lugares de que trata.

Cabe resaltar en el asunto que nos ocupa unos párrafos del relato del asedio de Cartago Nova por Escipión<sup>18</sup>. En ellos se narra un sistema para transmitirse mensajes entre diferentes partes del ejército basado en un código de señales luminosas.

<sup>18</sup> POLIBIO X, 45-46.

Dioptra

...

Se toma todo el alfabeto por su orden, y se divide en cinco partes, cada una de cinco letras. En la última parte faltará una letra, pero esto no importa para el asunto.

Después los que quieran informarse mutuamente por los fuegos prevendrán cinco tablillas y en cada una de ellas escribirán la parte de letras que toque por su orden. Se convendrán también entre si en que el primero que haya de dar la señal levantará dos fanales<sup>19</sup> a un tiempo y los mantendrá levantados hasta que el otro le corresponda con otros dos. Esto servirá sólo para estar de acuerdo entre sí desde cuándo ha de empezar la atención. Quitados estos fuegos, el que ha de dar la señal levantará primero fanales a su izquierda, para significar qué tabla se ha de mirar, si se ha de mirar la primera uno, si la segunda dos, y así de las demás. Del mismo modo levantará después fanales a su derecha, para dar a entender al que reciba la señal a qué letra ha de acudir de las escritas en la tabla.

Después de convenidos en estas señales, y retirados ambos a sus respectivas atalayas, será preciso que el que da la señal tenga una dioptra con dos canutos (fistulae) de forma que con el uno pueda distinguir la derecha y con el otro la izquierda que le corresponda.

...

Un detalle de enorme interés estriba en el hecho de que la visual se realiza mediante tubos. Ciertamente, un tubo, permite mayor precisión en la correspondencia de las alidadas y una forma constructiva más inalterable.

Pero aún resulta más inquietante la necesidad de mirar por el tubo para ver los fanales en la larga distancia. Esto implica claramente la existencia de lentes de aumento porque, de otra forma, no aporta mayor agudeza visual mirar por un tubo que por fuera de él.

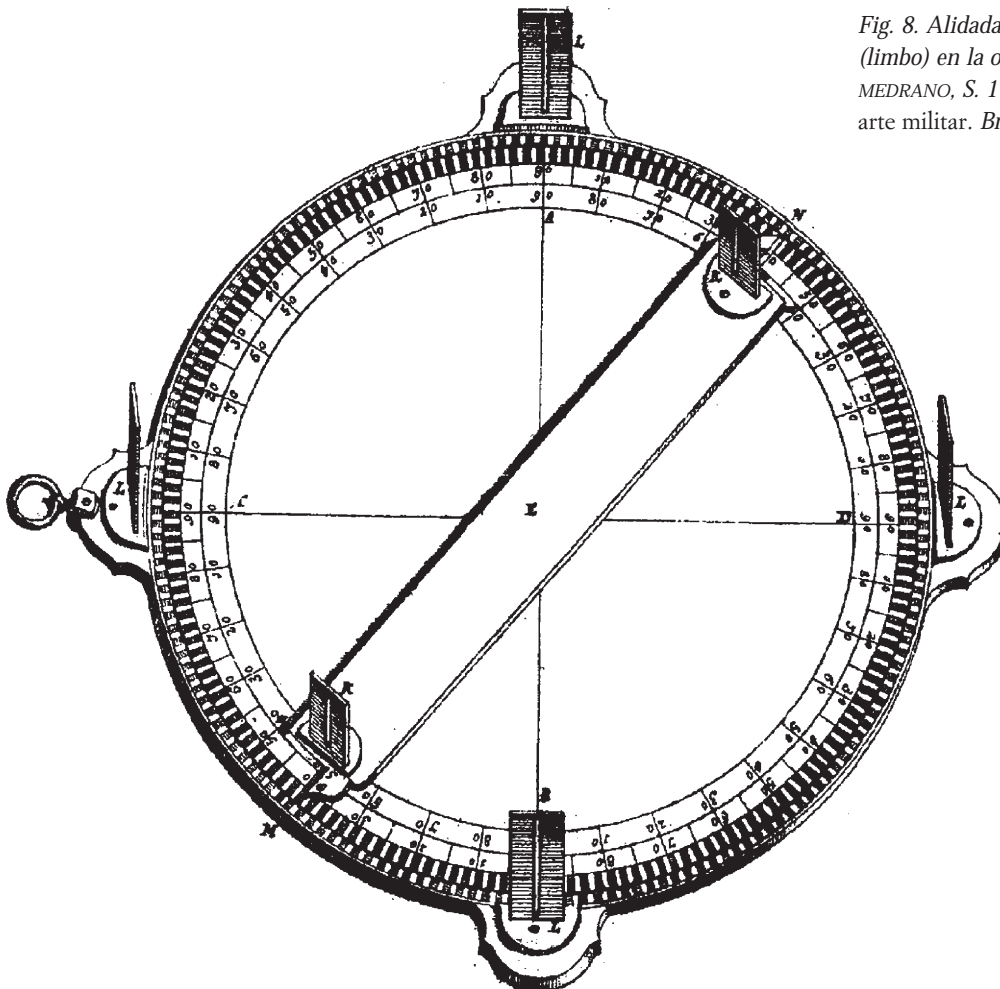


Fig. 8. Alidadas de pínulas sobre disco graduado (limbo) en la obra del siglo XVII: FERNÁNDEZ DE MEDRANO, S. 1700: El arquitecto perfecto en el arte militar. Bruselas.

ISAAC MORENO GALLO

Por tanto, la posibilidad de que la dioptra estuviera dotada de óptica no parece tan descabellada dados los conocimientos que de esta ciencia tenían los sabios de la antigüedad<sup>20</sup>. De esta forma se abre una perspectiva que acerca enormemente el aparato a los teodolitos modernos.

### 3. El teodolito romano

Si analizamos detenidamente la estructura de un teodolito moderno, de los que han servido para la medición y replanteo de las obras de ingeniería de los últimos dos siglos, veremos que realmente tiene los mismos componentes que los citados por Herón.

Un limbo horizontal soportado por un disco o similar y uno vertical soportado por un semicírculo, son los elementos principales de todo teodolito. En nada difieren estos conceptos de lo dicho por Herón.

Una cuestión fundamental es el hecho de que el limbo vertical esté sobre el horizontal. Esto es así porque el limbo horizontal debe ser estacionado en un plano horizontal inalterable, principio del correcto funcionamiento del teodolito, cosa que no ocurriría con el limbo vertical debajo.

En época moderna también se utilizó la alidada de pínulas sobre limbos graduados. A este tipo de aparatos se refieren

Hiparco y Herón en sus descripciones. Sin embargo, nuestra reconstrucción ha preferido ir más allá y adoptar el canuto mencionado por Polibio para con ello lograr un modelo de más fácil construcción y estable al paso del tiempo y a los deterioros producidos por el uso y el transporte.

Igualmente necesario es dotar al aparato de un sistema de nivelación eficaz en el plano horizontal.

Herón habla expresamente de que el pie de bronce es fijado a una rueda dentada mediante tres espigas. Esta frase imprecisa y quien sabe si correctamente traducida del griego, bien podría aludir a tres sencillos tornillos, cilíndricos como las espigas, que hicieran de esa rueda dentada una base nivelante.

Como ocurre en cualquier teodolito, un dispositivo debe fijar el plano preciso del limbo horizontal. Si en los modernos el nivel de burbuja ha sido ampliamente utilizado, una plomada, aun siendo más rudimentaria, no es menos eficaz.

Fijando mediante la plomada la exactitud de un plano vertical y de su plano perpendicular, lograremos el mismo efecto que sobre la horizontal realiza el nivel de burbuja.

La condición indispensable es que el aparato esté bien construido y los planos donde se establecen todas las piezas guarden la condición de perpendicularidad exacta.

<sup>19</sup> Faroles de señales.

<sup>20</sup> Tratados sobre óptica, algunos desaparecidos pero mencionados por otros autores clásicos, realizaron Euclides, Hiparco y Ptolomeo.



ARS MENSORIA

Dioptra

Fig. 9. Diseño básico a mano alzada que realizamos en 2004 de lo que podía ser una dioptra con alidada de pínulas. basado en las descripciones de Herón.

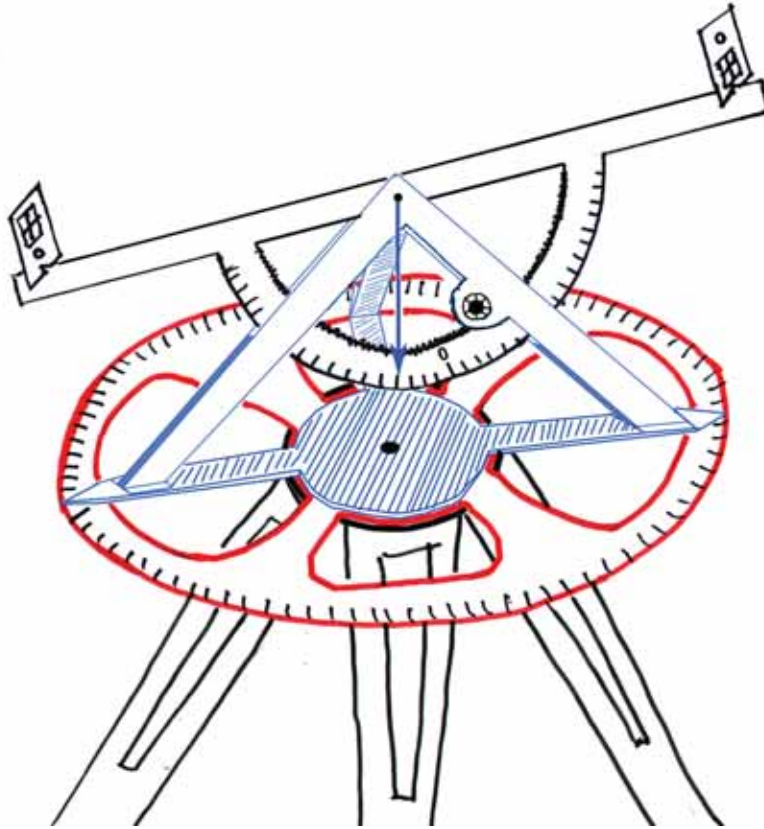
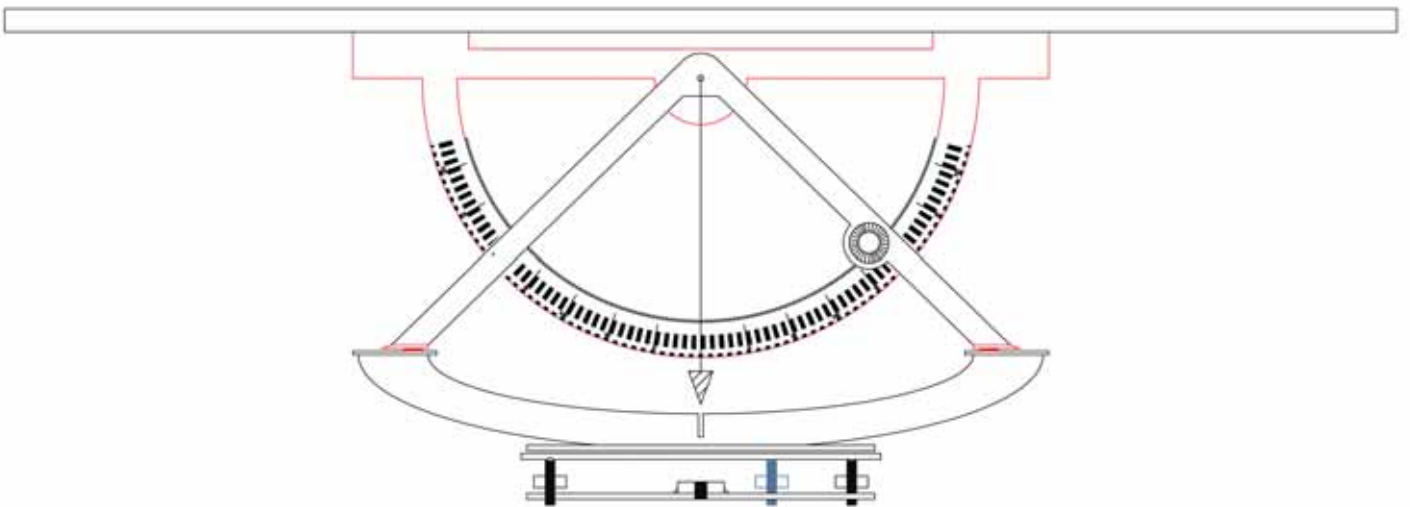


Fig. 10. Diseño CAD definitivo de la dioptra reconstruida en 2006.



ISAAC MORENO GALLO

*Fig. 11. Exhibición de la Dioptra reconstruida, junto a otros aparatos topográficos romanos. Actos de Tarraco Viva, Tarragona 2006.*



Dioptra

*Fig. 12. Topógrafos de la Legio I Germanica realizando labores de replanteo con la dioptra junto a la Via Avgvsta en Tarragona.*

