

## LA DISTANCIA AL SOL

Antonio Bernal González

Publicado en la revista *Astronomía, de Madrid*, en septiembre y octubre de 2012

*La determinación exacta de la Unidad Astronómica tiene menos de cien años. En este escrito narramos las dificultades vividas durante siglos para conseguir su valor actual.*

Una de las tareas más difíciles emprendidas por los astrónomos de todos los tiempos fue el cálculo de la distancia que nos separa del Sol, la Unidad Astronómica, que es fundamental porque sirve de base para calcular las órbitas de los planetas. Aunque parezca paradójico, el método que usó Friedrich Bessel en 1838 para encontrar la distancia a la estrella 61 Cygni, aún se usa hoy día; en cambio hubo que esperar hasta mediados del siglo XX para encontrar un procedimiento eficaz para encontrar la distancia al Sol, que está 700 mil veces más cerca que 61 Cygni. Una de las dificultades encontradas es que el Sol nos deslumbra y no nos deja ver el magnífico telón de fondo del cielo estrellado que podría servirnos de referencia para los cálculos. Los primeros cálculos de la distancia Tierra – Sol fueron simultáneos con los de la distancia Tierra – Luna y se hicieron en la Grecia antigua.

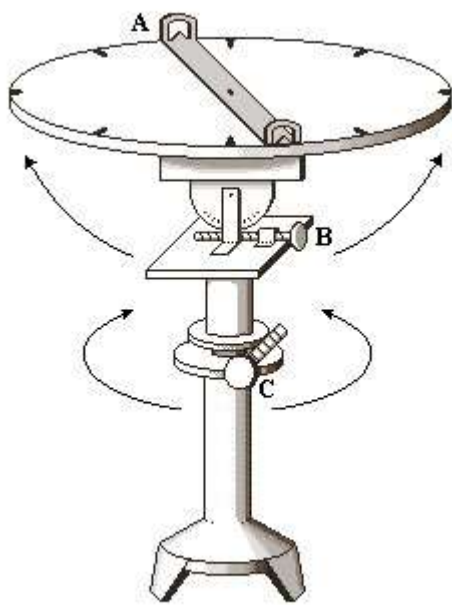
Imaginemos a un astrónomo de la antigüedad que se pregunta a qué distancia está la Luna. No tiene instrumentos, más que algunos muy elementales hechos de madera y no puede resistir el reto de tratar de calcular la distancia. ¿Por dónde empezar? Al primero que se le ocurrió una idea tan disparatada fue a Aristarco, un hombre genial que nació en la isla de Samos y que fue el primero en pensar que la Tierra no está en el centro del Universo sino que da vueltas alrededor del Sol. Su vida activa como astrónomo se desarrolló entre los años 280 y 240 a.C. El único trabajo suyo que ha llegado hasta nosotros se llama *Sobre los tamaños y las distancia del Sol y de la Luna* y en él hace sus cálculos basado en muy pocos datos conocidos o supuestos: que los tamaños aparentes del Sol y de la Luna, vistos desde la Tierra, son iguales y que cuando la Luna está en cuarto, los tres cuerpos - el Sol, la Tierra y la Luna - están en los vértices de un triángulo rectángulo en el que nuestro satélite ocupa el ángulo recto.

Con estos datos, Aristarco calculó que la Luna se encuentra a una distancia que es unas veinte veces mayor que el radio de la Tierra, y que el Sol está entre 18 y 20 veces más lejos de nosotros que la Luna. Aunque se quedó corto en los resultados, puesto que la Luna está a unos 60 radios terrestres y el Sol se encuentra 390 veces más lejos que la Luna, es de admirar su trabajo, desarrollado con tan pocos elementos. Los problemas principales del método de Aristarco consisten en que es muy difícil saber exactamente el momento en que la Luna está en cuarto y en la dificultad (aún en nuestros días) para medir el ángulo Luna – Tierra – Sol, que es un poco menor de 90 grados.

El segundo personaje que debemos recordar con relación al cálculo de la distancia al Sol es Hiparco, nacido en Nicea (actual ciudad turca de Izmir, al sur de Estambul), que vivió entre los años 190 y 120 a.C. No es fácil interpretar los resultados del trabajo de Hiparco puesto que aparecieron en un libro llamado *Sobre las distancias y los tamaños*, del que lo único que tenemos son referencias del astrónomo Tolomeo (siglo II d.C.) y del matemático alejandrino

Pappus (siglos III y IV d.C.). Por otro lado, toda interpretación de los cálculos antiguos se encuentra con la dificultad de la falta de estandarización en las unidades y de la inexistencia de una notación matemática coherente. Incluso en textos tan recientes como el *De Revolutionibus*, de Copérnico (1543) se mezclan los números en sistema decimal y sexagesimal, en notación árabe y romana y las fechas en calendario juliano con calendario egipcio. Como ejemplo, basta leer – por curiosidad – el siguiente párrafo que fija la fecha de una observación del planeta Saturno hecha por Tolomeo.

*Transcurren CXXXV años CCXXII días, XXVII minutos desde el principio de los años de Cristo hasta el año vigésimo de Adriano, día XXVIII del mes Messori, una hora antes del mediodía, momento de la observación de Tolomeo.*

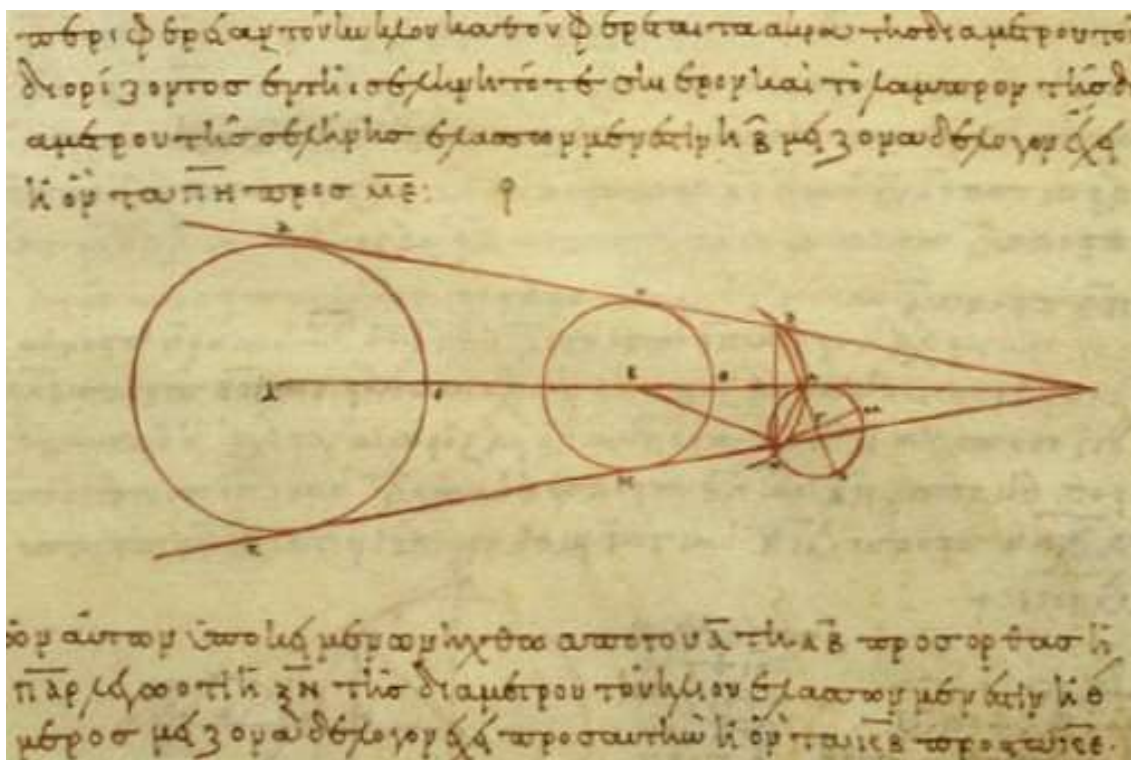


*El precursor de los modernos tránsitos y teodolitos, la dioptra, fue el instrumento que les permitió a los antiguos griegos calcular las distancias al Sol y a la Luna.*

Pues bien, de lo que dicen Tolomeo y Pappus se sabe que Hiparco hizo sus cálculos basado en la medición directa de los tamaños aparentes de la Luna y del Sol, por medio de la dioptra y en la observación de los eclipses de Luna. La dioptra era, entre los griegos, el instrumento por excelencia para la topografía, la astronomía y la ingeniería, heredado por los romanos y usado por ellos para construir los grandes acueductos y las obras de ingeniería que hoy nos asombran. Similar a los teodolitos modernos, tenía una escala que servía para medir ángulos horizontales a partir de un punto de referencia y otra con la que se medían ángulos en altura desde la horizontal hasta la vertical. No queda ni rastro de alguno de esos aparatos porque estaban contruidos casi en su totalidad de madera, pero tenemos la descripción hecha por Herón, el inventor y matemático alejandrino del siglo I de nuestra era. Por él sabemos que había dos tipos diferentes de dioptras, una que se usaba para nivelar y otra con la función de teodolito, para medir ángulos horizontales y verticales.

El hecho es que, por medio de la dioptra, Hiparco sabía que el ángulo medido entre dos bordes extremos de la Luna es medio grado y que haciendo la misma medición en el Sol el resultado es el mismo. Los dos cuerpos subtienden el mismo ángulo cuando se miran desde la Tierra. Por observación de un eclipse supo también que la Luna tiene un diámetro dos y media veces más

pequeño que el de la sombra que la cubre durante el eclipse. Esto pudo saberlo haciendo un dibujo muy preciso de la curvatura de la sombra proyectada en la propia Luna durante la fase parcial del eclipse. Armado con esta serie de datos, Hiparco calculó que la distancia a la Luna es unas 60 veces el radio terrestre.



*Uno de los dibujos del libro de Aristarco muestra las proporciones entre el Sol, la Tierra, la Luna y la sombra arrojada por la Tierra. Fueron elementos que usó para medir la distancia al Sol y a la Luna.*

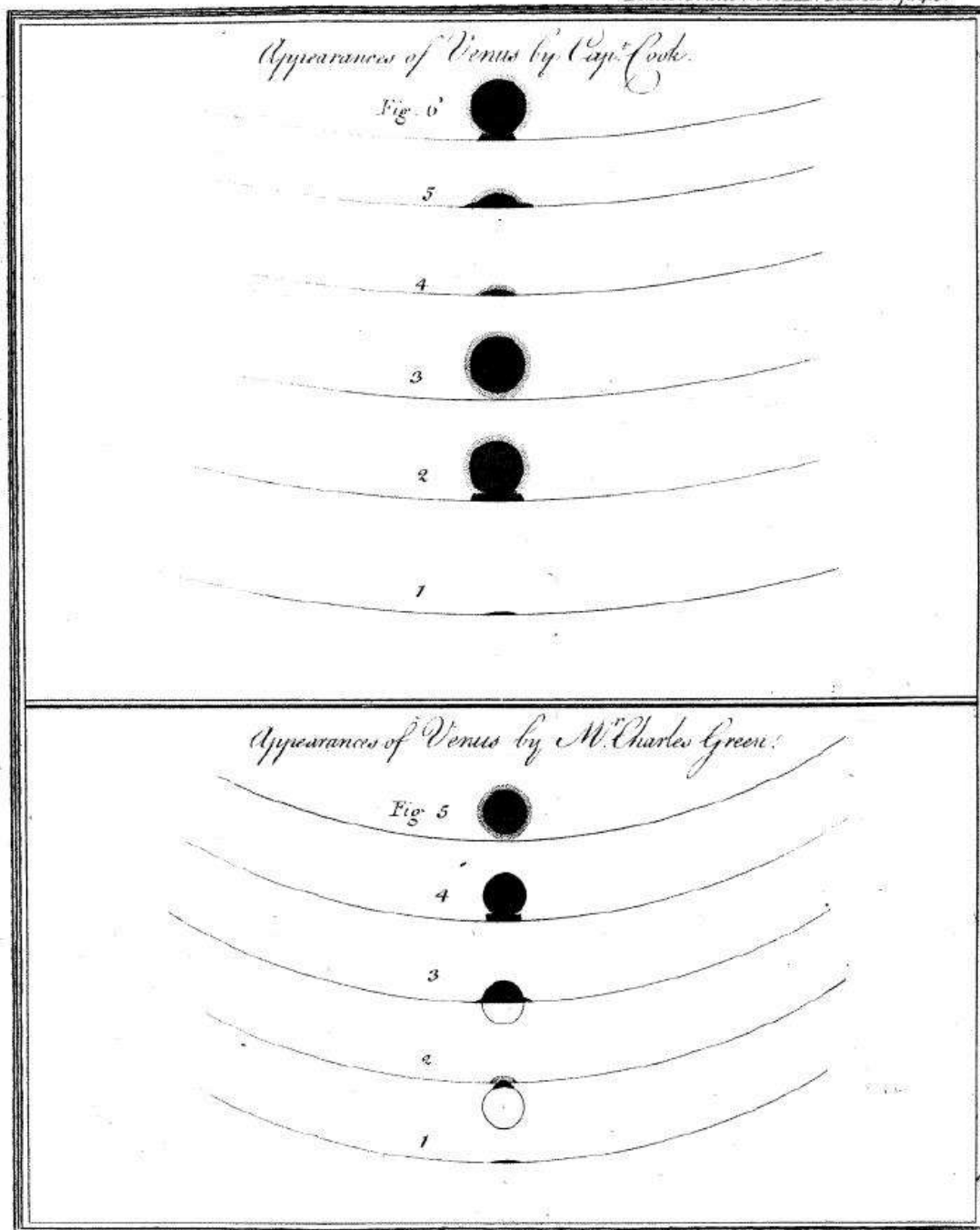
Según Pappus, Hiparco había hecho una medición similar en un eclipse anterior, pero utilizando un método diferente en el que las causas de error son mayores, y los resultados no fueron buenos. Pero hay que tener en cuenta que en casos como este cuenta más el ingenio puesto en el procedimiento que el resultado obtenido. Sabemos que la Luna está a unos 60 radios terrestres y el que Hiparco hubiera acertado una vez, es suficiente para que nos quedemos atónitos al ver la agudeza intelectual de quien trabajaba con tan pocos medios.

Tres siglos después, en el Almagesto de Tolomeo aparece el valor de la distancia de la Tierra al Sol, deducida de los datos de Hiparco y probablemente calculada por éste, como 1200 veces el radio terrestre. En términos absolutos equivale a más de siete millones de kilómetros, la distancia más grande jamás calculada por los antiguos. Este fue el valor de la unidad astronómica aceptado por los astrónomos durante más de 14 siglos. Es unas 20 veces menor que el real, pero hasta el siglo XVII no hubo quién hiciera un cálculo de mejor precisión.

La autoridad de Tolomeo hizo posible que su valor de la unidad astronómica, unos siete millones de kilómetros, se diera por cierto hasta que Johannes Kepler lo puso en entredicho a principios del siglo XVII, pensando que estaba errado en, por lo menos, un factor de tres. A partir de la aparición de sus leyes del movimiento planetario, en especial de la tercera, en 1619, la medición de la unidad astronómica no se hizo más por observación directa del Sol sino de otros cuerpos del Sistema Solar que se acercan más a la Tierra, como el planeta Marte que llega a estar a una tercera parte de la distancia que nos separa del Sol. Conociendo la distancia a cualquier cuerpo del Sistema Solar y aplicando esa ley, se puede saber el valor de la unidad astronómica. Los primeros que intentaron utilizar este método indirecto fueron los astrónomos del Observatorio de París, en la oposición de Marte de 1672, en la que, mientras que Domenico Cassini observaba el planeta desde el propio observatorio, Jean Richer lo hacía desde Cayenne, en la Guayana Francesa. Vista desde ambas localidades, la posición de Marte cambia ligeramente con respecto al fondo estrellado, debido a su cercanía a nosotros que es mínima si la comparamos con la distancia a las estrellas. Conocida con mucha precisión esta diferencia - llamada paralaje - se puede calcular la distancia al planeta y luego, aplicando la tercera ley de Kepler, se puede saber la distancia de la Tierra al Sol o *unidad astronómica*. El resultado obtenido fue cercano a los 140 millones de kilómetros, un error menor del 8%, que no está mal para ser la primera vez que se aplicaba el procedimiento.

Un método más efectivo para encontrar el valor de la unidad astronómica consiste en cronometrar los tránsitos del planeta Venus por delante del disco del Sol. Se trata de un fenómeno que ocurre dos veces por siglo, en el que el planeta se interpone entre el Sol y nosotros, de manera que lo vemos cruzar el disco solar como una pequeña mancha negra de forma circular. Desde dos lugares de la Tierra que estén en latitudes diferentes, las trayectorias de un tránsito recorren el círculo del Sol por lugares distintos y, por tanto, los tiempos totales de duración del tránsito son también diferentes. Cronometrando los tiempos con mucha precisión, se puede utilizar un método trigonométrico de triangulación para conocer las distancias a Venus y al Sol.

El método de los tránsitos de Venus fue utilizado por primera vez en 1639 por uno de los astrónomos más sorprendentes de la historia: Jeremiah Horrocks, llamado por algunos *Padre de la astronomía inglesa* y muerto por causas desconocidas a los 22 años de edad. El y su amigo William Crabtree fueron los únicos que observaron el tránsito de aquel año y, aunque sus observaciones fueron hechas desde localidades muy cercanas y sólo pudieron ver fragmentos del fenómeno a causa del mal tiempo, con base en sus observaciones se pudo hacer un estimativo basto de la unidad astronómica, de 90 millones de kilómetros. Posteriormente Edmond Halley promovió el método de los tránsitos para calcular la unidad astronómica y, aunque sabía que no viviría para presenciar el próximo, que sería en 1761, preparó unas instrucciones detalladas sobre cómo observarlo desde varios lugares de la Tierra, para obtener un valor muy exacto de la unidad astronómica. El problema grave era que el fenómeno se vería desde sitios muy apartados, a los que la eficiencia del viaje en barco dependía de que los vientos fueran favorables y a los que se tenía que ir con mucha anticipación para estudiar con gran precisión las coordenadas geográficas del lugar. Sin resolver ese problema, las observaciones serían inútiles. En resumen, eran viajes de varios años que más parecían aventuras de exploración, que trabajos científicos.



*El fenómeno de la gota negra, como fue registrado durante el tránsito de Venus de 1769. Este efecto atmosférico le resta precisión al cronometraje de los tiempos del tránsito.*

De los muchos aventureros que salieron a observar el tránsito desde Inglaterra, Francia y Austria, el caso más patético fue el del francés Guillaume Le Gentil que partió para el este de la India con un año y un mes de anticipación. No pudo llegar a su destino debido a una de las tantas guerras que entonces se libraban, por lo que decidió quedarse a esperar el siguiente tránsito que ocurriría ocho años después. Esta vez sí logró llegar y montar un observatorio, pero el día del tránsito el Sol salió entre nubes y permaneció invisible durante todo el día.

Defraudado, regresó a Francia después de once años y se encontró con que lo daban por muerto, su hacienda había sido saqueada por sus propios parientes y su silla en la Academia había sido ocupada por otro.

Pero no todos los aventureros que observaron los tránsitos de Venus de 1761 y 1769 fueron tan desafortunados como Le Gentil. Quizás la expedición más conocida fue la del capitán James Cook que, en su viaje alrededor del mundo, hizo escala en Tahití para observar el segundo de los tránsitos. En sus observaciones que fueron muy exitosas, se descubrió que el cronometraje de los tránsitos presentaba una dificultad inesperada: en el momento en el que el planeta está a punto de tocar el limbo del Sol o de apartarse de él, aparece la llamada "gota negra", una especie de alargamiento estrecho que parte de la silueta del planeta y llega hasta el borde del Sol. Esta ilusión óptica debida a efectos de la atmósfera terrestre, hace muy difícil estimar el momento exacto de inicio o terminación del tránsito con lo cual, el error puede llegar a ser de hasta 10 segundos.

Con los datos de Cook y de otros observadores, el astrónomo francés Jérôme Lalande estimó el valor de la unidad astronómica en 153 millones de kilómetros, la primera vez en la historia de la astronomía que se llegaba a una cifra superior al valor que conocemos hoy con tanta precisión, pero sólo un 2% por encima de él.

Con el problema de la incertidumbre en la medición de los tiempos y los intervalos de ocurrencia del fenómeno, que son de más de un siglo, los tránsitos de Venus demostraron ser un método poco práctico para el cálculo de la unidad astronómica. En 1898 hubo un descubrimiento providencial que abrió la puerta a una nueva serie de mediciones de precisión. Se trata del asteroide Eros cuya órbita pasa más cerca de la Tierra que el planeta Marte y que tendría su momento de menor distancia en 1901. Inmediatamente se revivió el método de la paralaje puesto en práctica por Cassini dos siglos atrás con el planeta Marte, pero con muchas ventajas. En primer lugar, la instrumentación había mejorado mucho durante ese tiempo y ahora se podrían hacer mediciones de más precisión; por otro lado, por ser tan pequeño – sólo 34 kilómetros de longitud –, Eros se ve como un objeto puntual en el ocular del telescopio, en contraposición con los planetas que muestran una superficie y por tanto es más difícil determinar un punto fijo en ellos. Pero lo más esperanzador era que la distancia de la Tierra al asteroide sería menor que la que, en teoría, puede llegar a haber hasta Marte, con lo que la paralaje sería mayor y se obtendría un resultado con menos error. Se hizo un llamado a todos los observatorios para que hicieran observaciones del asteroide y, de todos los datos recogidos, el astrónomo británico Arthur Hinks, del Observatorio de Cambridge, calculó en 1909 un nuevo valor de la unidad astronómica que difiere en menos de un 0,2% del valor conocido hoy. Pero a pesar de tanta precisión, el valor no fue lo bastante exacto para satisfacer las mentes matemáticas de los astrónomos. Por esa razón la tarea se repitió en la oposición de Eros de 1930 y los datos recogidos en todo el globo fueron resumidos en el cálculo hecho por el Astrónomo Real Sir Harold Spencer Jones quien en 1941 dio un valor con un error diez veces menor que el anterior.

Pero ni aún así quedó satisfecha el ansia de exactitud. Hoy disponemos de otros métodos para medir las distancias a los planetas, como los ecos de radar, y hemos llegado al valor de 149 597 870,700 kilómetros, para la unidad astronómica, en el que el error probable se sitúa en la tercera cifra decimal.

| <b>Autor</b>                           | <b>Distancia<br/>(km)</b> | <b>Año</b>                      |
|----------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| <i>Aristarco de Samos</i>              | <i>7 296 000</i>          | <i>Aprox 290 a.C.</i>           |
| <i>Hiparco de Nicea</i>                | <i>3 124 000</i>          | <i>Nacido en el 190 a.C.</i>    |
| <i>Tolomeo</i>                         | <i>7 714 000</i>          | <i>Nacido en el 100 d.C.</i>    |
| <i>Pappus de Alejandría</i>            | <i>3 124 000</i>          | <i>Nacido hacia el 290 d.C.</i> |
| <i>Al Farghani</i>                     | <i>7 459 000</i>          | <i>Nacido en el 805 d.C.</i>    |
| <i>Al Battani</i>                      | <i>7 064 000</i>          | <i>Nacido en el 858 d.C.</i>    |
| <i>Copérnico</i>                       | <i>7 280 000</i>          | <i>1543</i>                     |
| <i>Tycho</i>                           | <i>7 331 000</i>          | <i>Nacido en 1546</i>           |
| <i>Kepler</i>                          | <i>23 141 000</i>         | <i>Nacido en 1571</i>           |
| <i>Godefroy Wendelin</i>               | <i>84 851 000</i>         | <i>1630</i>                     |
| <i>Cassini – Richer</i>                | <i>138 400 000</i>        | <i>1672</i>                     |
| <i>Edmond Halley</i>                   | <i>111 000 000</i>        | <i>1716</i>                     |
| <i>Lalande (datos de Cook y otros)</i> | <i>153 072 000</i>        | <i>1771</i>                     |
| <i>Simon Newcomb</i>                   | <i>149 245 200</i>        | <i>1895</i>                     |
| <i>Arthur Hinks</i>                    | <i>149 372 700</i>        | <i>1909</i>                     |
| <i>H Spencer Jones</i>                 | <i>149 999 148</i>        | <i>1941</i>                     |
| <i>Valor moderno</i>                   | <i>149 597 871</i>        |                                 |

*Resumen de los valores calculados a lo largo de la historia para la distancia Tierra–Sol, en kilómetros.*