

# AZARQUIEL: LA APORTACIÓN DE UN SABIO ESPAÑOL A LA CIENCIA ASTRONÓMICA Y A LA NAVEGACIÓN DEL RENACIMIENTO

Alfredo SURROCA  
de la Real Academia de la Mar

## Resumen

El objetivo pretendido es dar a conocer uno de los excepcionales sabios españoles de la Edad Media que destacaron tanto por sus obras en sí mismas como por su repercusión en la ciencia mundial. Presentaremos un personaje de primera magnitud, al-Zarqali (Azarquiel), así como su obra más representativa: el astrolabio universal o azafea, uno de los pilares sobre los que se sustentaba, y se sustenta, la astronomía de posición.

Una diferencia esencial entre las tablas astronómicas y el astrolabio es que aquellas hacen referencia a las posiciones del Sol, la Luna y los cinco planetas entonces conocidos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, mientras que el astrolabio solo contempla las posiciones del Sol y las demás estrellas, y estas últimas en número inferior a cuarenta. Aunque instrumento y documento, astrolabio y tablas, están íntimamente interconectados por su especial vinculación, en este artículo se trata únicamente del astrolabio de Azarquiel.

Palabras clave: astrolabio, astronomía, Azarquiel, instrumentos náuticos.

## Abstract

The aim is to present some of the exceptional Spanish sages of the Middle Ages who stood out both for their works and for their impact on world science. We will present two characters of first order, Al Zarqali (Azarquiel) and Abraham Zacuto, as well as their respective most representative works, the universal astrolabe or asapha and the perpetual almanac, which are the two pillars on which positional astronomy was, and is, sustained. An essential difference between the astronomical tables and the astrolabe is that the former refer to the positions of the Sun, the Moon and the five planets then known, Mercury, Venus, Mars and Jupiter, while the astrolabe contemplates only the positions of the Sun and forty stars. Although instrument and document, astrolabe and tables, are intimately connected and the aforementioned authors worked on both, it seems appropriate, for better clarity and for their special connection, to associate the astrolabe to Azarquiel and the tables to Zacuto, and so we will proceed in this presentation.

Key words: Astrolabe, astronomy, Azarquiel, nautical instruments.

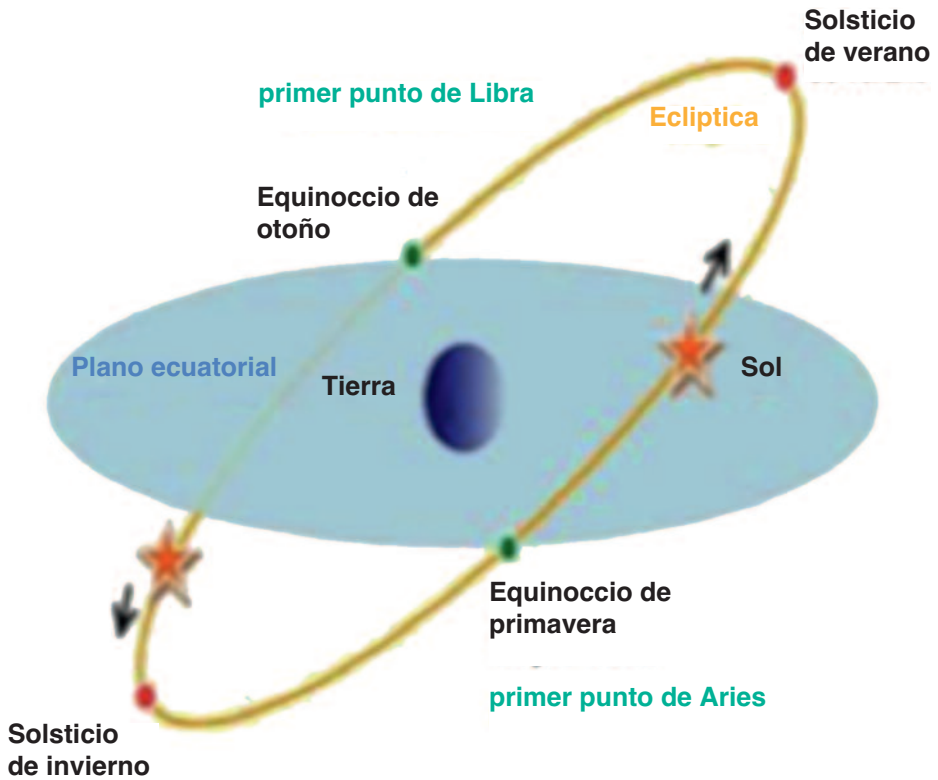


Fig. 1. Geocentrismo, eclíptica y declinación anual

## Azarquiel

### *Cuestiones previas*

**A**NTES de entrar en el fondo de la exposición es conveniente recordar algunas características relacionadas con tres líneas: eclíptica, ecuador y horizonte, a las que aludiremos frecuentemente y que son esenciales para la comprensión de astrolabio y tablas.

La teoría geocéntrica sostenida por cartógrafos durante la Edad Media y los albores del Renacimiento es una teoría correcta pero siempre que contemplemos el movimiento de los astros limitándolo a su contenido meramente cinemático, esto es, a posiciones, velocidades y distancias (1). La posición aparente del Sol (fig. 1) sobre la eclíptica puede definirse, para cada momento del año, indicando, a partir del punto de Aries, los grados recorridos de 0 a

(1) En 1560, el gran cartógrafo Gerard Kramer sostenía todavía la teoría geocéntrica.

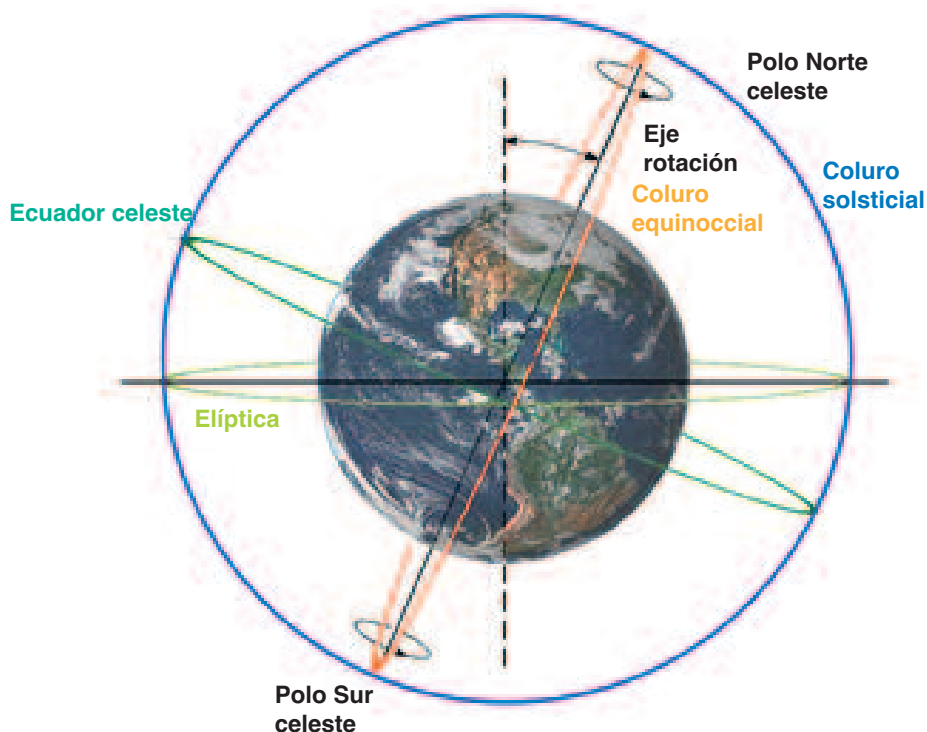


Fig. 2. Coluro solsticial y coluro equinoccial

360, o bien los grados recorridos de 0 a 30 para cada uno de los 12 signos zodiacales. También puede señalarse con la declinación solar, o altura del Sol respecto del plano ecuatorial, de  $-23,5^\circ$  a  $+23,5^\circ$ . Esta última es la más utilizada en la actualidad.

Para las necesidades de precisión requeridas en la Edad Media, podía estimarse que la trayectoria y posición del Sol sobre la eclíptica permanecían prácticamente constantes para cada momento del año. Esto es, la trayectoria y posición calculada para un año dado podía mantenerse durante años sucesivos.

Recordemos el significado de dos meridianos celestes singulares, los coluros solsticial y equinoccial (2). Son (fig. 2) dos planos meridionales perpendiculares entre sí que, además de pasar por los polos, lo hacen por los solsticios o por los equinoccios respectivamente.

En cuanto al significado de almicantrat, se corresponde con las líneas o planos que son paralelos al horizonte del observador. Como ocurre con el

---

(2) Antiguamente se llamaba coluros a todos los meridianos. En la actualidad, esta denominación se reserva para estos dos meridianos singulares.

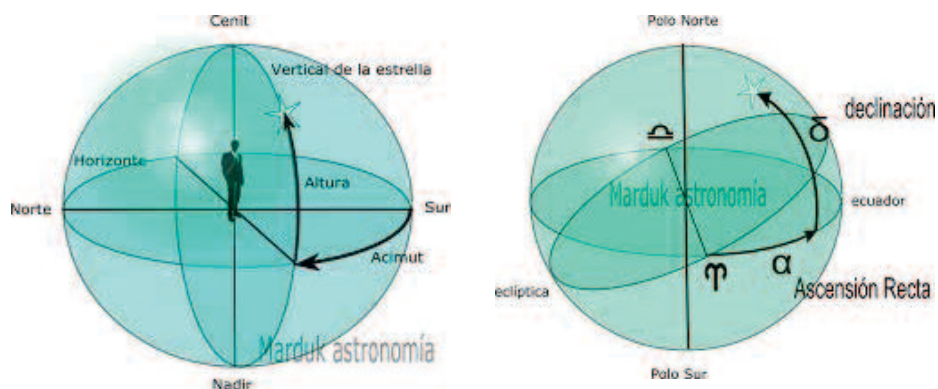


Fig. 3. Coordenadas horizontales y ecuatoriales

horizonte, el almicantarat depende de la latitud del observador, y su utilización se circunscribe casi exclusivamente a lo relacionado con el uso y fabricación de astrolabios. Por último, recordemos también que las coordenadas horizontales de los astros (altura y azimut) son coordenadas locales, pues dependen del horizonte y este, a su vez, depende de la latitud del observador (fig. 3). Conviene tener presente que las coordenadas horizontales, altura y azimut, son las únicas medibles directamente por el observador. Las coordenadas ecuatoriales, declinación y ascensión recta (3), por el contrario, no dependen de la situación del observador ni pueden ser medidas directamente por este.

La declinación de las estrellas, excepto la del Sol, cambia muy poco con el tiempo, puesto que solo poseen el movimiento de rotación alrededor del eje del mundo, perpendicular al ecuador.

#### *Vida y obra (4)*

Se conocen pocos datos de su vida, pero existe una reveladora minibiografía de Azarquiel en la obra de Ishak Israel: «Azarquiel al principio no era más que un hábil artista o forjador en hierro o metal y que trabajaba en la confección de instrumentos astronómicos que le encomendaban sabios musulmanes y judíos de la ciudad de Toledo».

A continuación se presenta una relación cronológica y los hitos más destacables de su vida.

(3) Esta singular denominación se debe al caso particular en que el observador está situado en el ecuador, «esfera recta». En este caso la ascensión recta corresponde a la trayectoria solar, que es perpendicular al ecuador.

(4) Zarquiel es el nombre que se otorgaba a las personas cuyo cabello tiende al rubio o cuyos ojos son de color azul claro o zarcos.

Azarquiel nació en el año 1030 en Toledo y murió en 1100 en Córdoba (5). Siendo Azarquiel muy joven, y habiendo mostrado su gran habilidad e inteligencia, el caíd Said al-Andalusi, que ejercía la justicia en el reino toledano y era un apasionado de la investigación y el estudio de las ciencias, lo tomó bajo su protección y lo introdujo en el estudio de la ciencia de los antiguos.

En 1048, a los dieciocho años, Azarquiel creó un nuevo modelo de astrolabio llamado *azafea* (6). En 1069 dirigió la confección de las Tablas toledanas a petición del rey musulmán de Toledo, al-Mamoum. Según se deduce del estudio de estas tablas, Azarquiel estaba en disposición de realizar predicciones de suma importancia dentro de la astronomía, pues tenía en su poder datos precisos sobre multitud de fenómenos. Pudo emplear las Tablas para predecir los eclipses solares que sucederían años, e incluso siglos, más tarde.

En 1075 crea la segunda *azafea* en Córdoba, donde «hizo otra *azafea* más complicada y acabada» (7).

La *azafea* es un instrumento derivado del astrolabio que, a diferencia de este, puede ser utilizado por un observador situado en cualquier latitud. De ahí que se le conozca como «astrolabio universal». De todos los inventos que permitieron la navegación oceánica, la *azafea* es, probablemente, el más importante. Fue utilizada por Colón en su primer viaje a América y por Magallanes y Elcano en su vuelta al mundo, cuatrocientos años después de que la inventara Azarquiel.

Cuando el reino de Toledo fue conquistado por Alfonso VI de León y Castilla en 1085, hacía años que Azarquiel se había trasladado a Córdoba, donde permaneció hasta su fallecimiento, en octubre de 1100.

Azarquiel, que no era marino, mostró un gran interés por la geografía y la astronomía. Recalculó correctamente el tamaño del mar Mediterráneo y el movimiento del afelio terrestre (8) con sorprendente precisión. Durante decenas de años se dedicó a catalogar estrellas y planetas y a medir el apogeo solar (9), así como la posición de los planetas en cualquier día y hora del año.

De esta forma, creó el primer Almanaque, que constituye el fundamento de las Tablas de Toledo y, posteriormente, de las alfonsíes. El Almanaque fue traducido al latín por Gerardo de Cremona, décadas después de su muerte. De esta manera, la astronomía pudo renacer en el mundo cristiano occidental tras siglos de oscuridad.

Entre 1225 y 1231, se realizó la traducción al latín del *Tratado de la azafea*, libro actualmente perdido en su versión original pero que, afortunada-

---

(5) En los *Libros del saber de astronomía* de Alfonso X se afirma, erróneamente, que murió en Sevilla, quizá porque Córdoba formaba parte del reino de taifa de Sevilla.

(6) *Azafea* significa «lámina», que es la parte esencial de los astrolabios

(7) Así la describe Alfonso X en los *Libros del saber de astronomía*.

(8) El *afelio* es el punto más lejano de la órbita de un cuerpo celeste alrededor del Sol.

(9) Después de estar observando el Sol durante veinticinco años, descubrió la variación del apogeo solar con error mínimo, 12,04' al año, si lo comparamos con el valor actual, que es 11,8' al año. El apogeo solar es el ángulo con el que se observa el Sol cuando se encuentra en el punto más lejano de la eclíptica.

mente, el rey Alfonso X mandó traducir a Yehuda Mosca y Guillelmus Anglicus. En 1260, este último lo tradujo al castellano.

Alfonso X el Sabio editó en 1262 las Tablas alfonsíes, que mejoraban las Tablas toledanas de Azarquiel, y mandó incluir en ellas la traducción del *Tratado de la azafea*.

Para mejor comprender la obra de Azarquiel, la *Saphea Arzachelis* o astrolabio universal, es necesario un conocimiento básico del astrolabio clásico del siglo x.

### *Astrolabio clásico*



Fig. 4. Astrolabio de al-Sahfi. Toledo, 1064.  
Museo Arqueológico Nacional, Madrid

Su existencia se acredita desde hace más de 2.000 años en Mesopotamia. Durante siglos se fue desarrollando por intermedio de numerosos astrónomos, en diversos países, hasta adquirir una notable complejidad. Formó parte de los estudios de Hiparco de Nicea y de Ptolomeo en Alejandría, y luego fue perfeccionado con detalle por los árabes en Bagdad a finales del siglo VIII, tras la incorporación de Persia al imperio árabe. A partir del siglo IX, se fabricó intensivamente en al-Andalus y fue objeto de profundas modificaciones.

Pero ¿qué es y para qué sirve un astrolabio? Contestando a la primera pregunta, podríamos definirlo como un instrumento astronómico portátil que se utiliza para resolver problemas relativos al tiempo, fecha y hora, y a la posición absoluta y relativa que ocupan del Sol y otras estrellas en el firmamento. Etimológicamente quiere decir «buscador de estrellas» en griego, y el más antiguo actualmente existente data (10) del 927 d.C.

El astrolabio es un mapa del firmamento diseñado en dos dimensiones, como sucede con todos los mapas, y grabado sobre metal, normalmente latón. Algunos autores definen el astrolabio como un instrumento que sirve para mostrar el cielo tal como se ve desde cierto lugar y a una hora determinada. Esta afirmación, aunque cierta, es incompleta, pues en el astrolabio se incluye algo muy importante que no se ve en el firmamento: las coordenadas celestes. Concretamente, las coordenadas horizontales, altura y azimut, que son, como ya se ha indicado, las que un observador puede medir directamente contem-

(10) El astrolabio más antiguo que se conserva fue construido por el astrónomo persa Nastulus hacia el año 927. Se encuentra en el Museo Nacional de Kuwait.

plando simplemente los astros y el horizonte.

En cuanto a para qué sirve, el astrolabio también puede ser considerado una calculadora portátil para resolver problemas de índole astronómica. Se ingresan unos datos y se recogen unos resultados.

Los datos de entrada son, necesariamente, los elementos geométricos de la esfera celeste. Si se trata de representar la posición de una estrella, que es el caso más común, estos datos serían sus coordenadas horizontales. Otros datos susceptibles de ser ingresados son la hora y fecha.

Los datos de salida ponen de manifiesto cuál es su utilidad o, en otros términos, para qué sirve el astrolabio. Sirve para identificar las estrellas; para resolver problemas de horas, fechas y situación de ellas; para saber las horas del orto y ocaso de los astros; para saber la situación del Sol sobre la eclíptica y la zona zodiacal donde este se encuentra; para conocer la declinación del Sol en una fecha dada; para conocer las coordenadas horizontales y ecuatoriales de una estrella; para determinar la altura máxima del Sol, etc. En general, puede decirse que el astrolabio permite resolver cualquier problema astronómico de posición por vía meramente visual, sin utilizar la trigonometría esférica. De él se dice que tiene más de 450 aplicaciones.

En su versión clásica, el astrolabio no estaba especialmente diseñado con el fin de ayudar a la navegación, pero puede ser considerado un instrumento náutico puesto que permite calcular parámetros de gran importancia para la navegación, como las horas del orto y ocaso del Sol. Es cierto que este cálculo exige que la nave se encuentre en la latitud de la lámina, pero también lo es que usualmente se disponía de un juego de láminas que permitía cierta flexibilidad y que la navegación de aquella época, realizada principalmente en el mar Mediterráneo y golfo pérsico, rara vez cambiaba en más de tres grados de latitud.

### *Representación plana*

El hombre siempre ha tenido presente que el cielo o firmamento por él observado se corresponde con una semiesfera que, obviamente, es un cuerpo de tres dimensiones. Su representación sobre una superficie plana, que es como aparece ante nuestros ojos, tiene la dificultad inherente al paso de un espacio



Fig. 4bis. Frontal de astrolabio, 1598. Museo Naval, Madrid (MNM-1279)

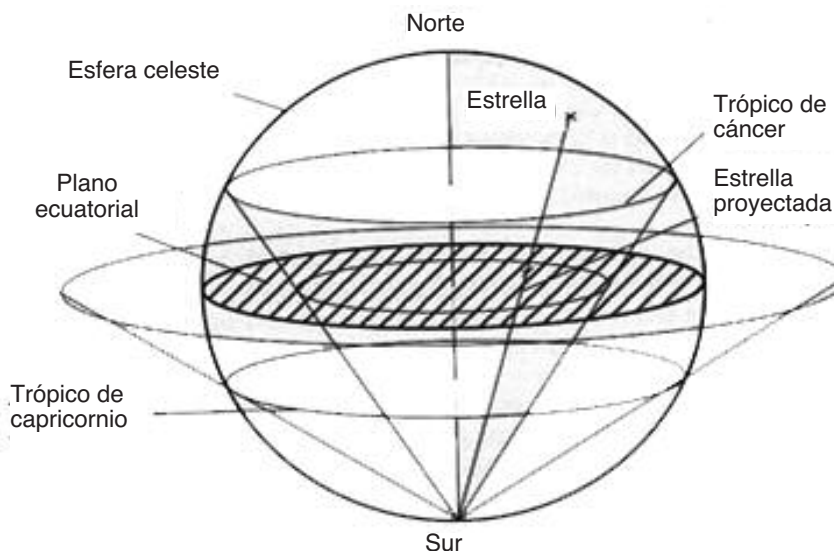


Fig. 5. Proyección estereográfica. Hemisferio norte

tridimensional a otro bidimensional. En nuestro caso, la superficie plana no es la de un papel, como sucede en los mapas, sino la superficie del astrolabio.

Así pues, el primer problema que se presenta es cómo trasladar la superficie esférica de los hemisferios celestes observados desde la Tierra a la superficie plana del astrolabio.

Para ello se requiere tomar tres decisiones. En primer lugar, escoger un sistema de proyección adecuado, es decir, definir qué criterio o fórmula se emplea para trasladar los puntos del firmamento a los puntos de un plano; en segundo lugar, determinar el plano sobre el que se desea realizar la proyección y, en tercer lugar, escoger un punto de referencia o foco desde el que se realiza la proyección. El sistema de proyección adoptado desde el comienzo de la construcción de astrolabios es un sistema llamado *proyección estereográfica* (fig. 5). Es un sistema de los llamados «conformes», porque tiene la virtud de conservar los ángulos aunque no las distancias (11). El procedimiento de proyección estereográfica consiste en trazar la recta que une cada estrella con el polo del hemisferio opuesto, en nuestro caso, con el Polo Sur celeste. El punto de corte de esta recta con el plano ecuatorial determina la posición de la estrella proyectada. Cabe preguntarse cómo determinaban los antiguos la posición de este punto de corte. La distancia del punto de corte al centro del astrolabio se determina mediante una sencilla fórmula llamada *ecuación fundamental del astrolabio*

(11) La demostración de que la proyección estereográfica conserva los ángulos es relativamente reciente. Aparece por primera vez en el *Tratado sobre el astrolabio* de al-Farghani, hacia el 856 d.C.



(12), y el ángulo del punto de corte respecto del norte es el mismo que presenta la estrella en el firmamento, puesto que es una proyección conforme.

La elección del plano ecuatorial celeste fue tomada hace miles de años. Se podrían haber escogido otros planos, tales como el de la eclíptica, el horizontal o un determinado plano meridiano, pero se adoptó el plano ecuatorial celeste porque posee una realidad física en sí mismo, es independiente de la posición del observador, es perpendicular al eje del mundo y determina de forma inequívoca los dos hemisferios celestes más usuales, hemisferios norte y sur.

Respecto al otro elemento importante de la proyección, el punto desde el que esta se realiza, llamado *punto de referencia* o *foco*, se adoptó el Polo Sur celeste. En el caso de desear representar el hemisferio celeste sur, el polo de referencia sería el Polo Norte celeste. Por ser conforme, la proyección de una circunferencia de la semiesfera celeste sobre el plano ecuatorial seguirá siendo una circunferencia. Se observa, en efecto, que la proyección del ecuador y los trópicos sigue formando circunferencias concéntricas. Una singularidad de la superficie plana representada en un astrolabio es que su extensión viene limitada por una circunferencia que posee un diámetro mayor que el de la proyección del ecuador celeste. En realidad, esto se debe al hecho de que, en los astrolabios, la proyección del hemisferio norte se extiende más allá del ecuador, concretamente hasta el Trópico de Capricornio que, como es bien sabido, se encuentra en el hemisferio sur.

Puede verse que el círculo correspondiente a la proyección de este trópico es de mayor diámetro que el del ecuador. Así pues, el borde del disco del astrolabio para el hemisferio norte corresponde, siempre, al Trópico de Capricornio. Si se tratara del astrolabio para el hemisferio sur, su borde correspondería al Trópico de Cáncer.

Fue a partir del descubrimiento de América y del hallazgo de la Geografía de Ptolomeo en 1404 (13) cuando aparecen las cartas de navegación planas o cuadras, para cuya confección y uso fue imperativo el conocimiento de las latitudes. La determinación precisa de la latitud en la que, durante el día, se encuentra un observador fue una cuestión tan importante como lo fue, posteriormente, la determinación de la longitud.

### *Partes del astrolabio*

Para cumplir con la función requerida, se ha diseñado el astrolabio como un instrumento constituido por partes claramente diferenciadas que pasamos a describir.

---

(12) La fórmula es  $r = R \frac{\cos \delta}{1 + \sin \delta}$ , siendo  $r$  la distancia buscada,  $\delta$  el ángulo que subtiende la estrella y  $R$  el radio arbitrario de la esfera celeste.

(13) La Geografía de Ptolomeo, escrita sobre en el siglo I, no se descubrió hasta 1404. Se tradujo al latín y se le dio forma de mapa por orden del papa español Alejandro VI. Sin embargo, no parece exacta esta versión, que es la más popular. En efecto, es muy probable que, como sucedió con tantas obras griegas, la Geografía de Ptolomeo llegara a España más de tres siglos antes de la mano de los eruditos persas. El mapamundi de al-Juarismi, de 890, y el del ceutí al-Idrisi, realizado en Sicilia en 1160, así parecen demostrarlo.

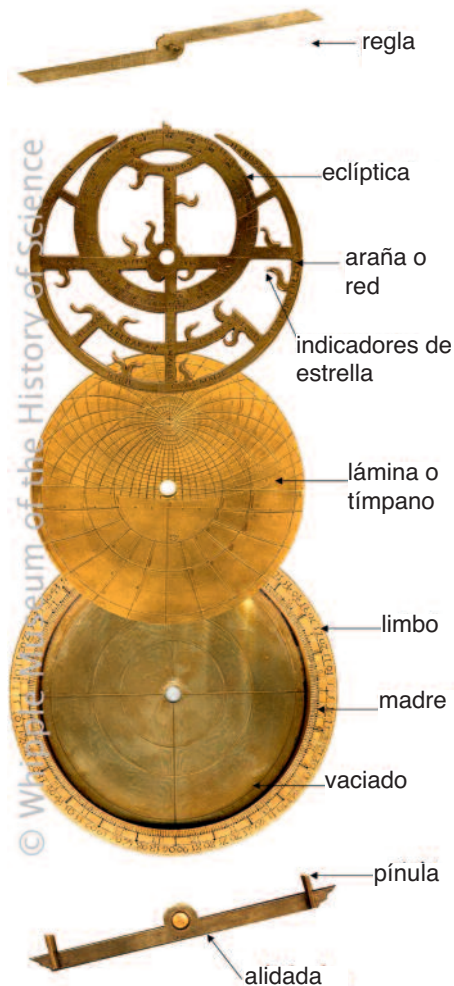


Fig. 6. Partes del astrolabio

Para no extendernos demasiado y no complicar la exposición, insistiremos en las tres partes frontales (fig. 6), que son las fundamentales: la *araña*, también llamada *red*, que es giratoria; la *lámina*, llamada también *tímpano*, que es fija, y el *limbo*, que es una corona graduada, también fija, que rodea a las dos anteriores. Las partes fijas son solidarias con el cuerpo del astrolabio, llamado *madre*, pero solo la *lámina* es sustituible.

Es en esta zona frontal donde se resuelven la mayor parte de los problemas. La parte posterior, que no vamos a examinar en detalle, contiene direcciones particulares, posición del Sol en la eclíptica, ábacos de funciones trigonométricas, una alidada de pínulas para medir la altura de los astros, un ábaco para calcular las horas de rezo, etc. La parte ricamente decorada que sirve para sustentar el astrolabio se llama *trono* y no es parte baladí, como se podría pensar a primera vista pues, además de la obvia función de sustentación, permite que el astrolabio sea sostenido firmemente en posición perpendicular a nuestro plano horizonte, cuestión importante para la correcta medida de las coordenadas horizontales.

Veamos con algún detalle en qué consisten y cuál es la función de estas partes.

*Araña.* La *araña* (fig. 7) es una parte circular plana donde se representa la posición de las principales estrellas de la semiesfera celeste. Podríamos decir que es el resultado de la mencionada proyección. Se trata de la representación del firmamento visto por un observador situado en el Polo Norte terrestre.

La *araña* está formada por «brazos» que, mediante sus puntas o espolones, indican la situación de las 20 a 40 estrellas más brillantes. La estructura vaciada de la *araña* tiene el objeto de visualizar con cierta comodidad los datos grabados sobre la *lámina* fija situada debajo de ella. En los espolones, o cerca de ellos, figura escrito el nombre de la estrella correspondiente.



Fig. 7. Araña de 32 estrellas y eclíptica

Para todos los astrolabios del mismo diámetro, todas las arañas son intercambiables entre sí. La única diferencia sería la parte artística con la que se han diseñado sus brazos y el número de estrellas que aparecen. La araña es móvil, pues puede rotar  $360^\circ$  alrededor de su centro y, de este modo, representar la posición relativa de las estrellas a lo largo de las veinticuatro horas del día. El valor del giro de la araña expresado en grados u horas se conoce gracias al limbo que, fijo y formando parte de la madre, aparece subdividido en  $360^\circ$  y veinticuatro horas.

Podría llamar la atención que el Sol, siendo una estrella, no aparezca en la araña. La razón es que el Sol no podría representarse mediante un punto fijo, como ocurre con las demás estrellas, porque su movimiento aparente anual alrededor de la Tierra lo impide. Pero lo que sí se puede reproducir, y así se hace, es la trayectoria anual del Sol, la eclíptica, mediante una corona circular fijada solidariamente a la araña. La unión solidaria de esta corona con el cuerpo de la araña se justifica porque el Sol debe conservar el giro diario que siguen todas las estrellas.

Si queremos conocer la posición concreta del Sol en un día dado del año, debemos recurrir a la parte posterior del astrolabio, donde se indica la longitud del Sol sobre la eclíptica para cada día del año. Si este valor se traslada, mediante la regla giratoria, a la citada trayectoria solar que aparece en la araña, tendremos fijada inequívocamente la posición del Sol. La regla es, pues, un accesorio importante que sirve para mostrar la posición del Sol sobre la eclíptica y para señalar la hora sobre el limbo. Cabría preguntarse por qué la trayectoria del Sol representada en la araña es tangente al borde de esta. La explicación es que el borde de la araña, como se ha dicho antes, viene dado por la proyección del Trópico de Capricornio que, por definición, debe ser alcanzado por el Sol en el punto más al sur de su trayectoria. Surge de inmediato una sencilla aplicación del astrolabio: si con la alidada de pínulas que figura en su parte posterior medimos la altura de una de las estrellas que aparece en la araña, pongamos  $45^\circ$ , basta girar la araña hasta que el espolón de la estrella coincida con la graduación de  $45^\circ$  señalada en la lámina. El ángulo de giro que hemos realizado, teniendo presente que  $15^\circ$  es una hora, nos dará la hora local en ese momento.

Pero la posición de las estrellas y del Sol que aparece en la araña no es la que puede contemplar un observador, a menos que este esté situado en el Polo Norte terrestre. En cualquier otra latitud donde se halle el observador, su cenit no coincidirá con el Polo Norte ni, consecuentemente, su horizonte coincidirá con el ecuador. Para resolver esta cuestión, y representar en el plano el cielo realmente visto por un observador desde cualquier latitud, se requiere la presencia de una parte fundamental del astrolabio que contiene las coordenadas horizontales de las estrellas. Esta parte es la llamada *lámina*.

*Lámina.* La *lámina* es la placa donde se representa, mediante líneas, el resultado de la proyección sobre el plano ecuatorial de las coordenadas horizontales, las que vemos cuando observamos el firmamento. Algunos autores consideran que la *lámina* es el corazón del astrolabio y que, en definitiva, determina la calidad de este (fig. 8). Las líneas proyectadas sobre la *lámina* se pueden agrupar en dos familias:

- a) Una de ellas es la que resulta de la proyección de unas líneas geográficas singulares, cuya forma y posición no depende de la latitud del observador y cuyo grabado es relativamente sencillo. Tales líneas son los trópicos, el ecuador y los polos, que aparecen como puntos y círculos concéntricos, completos y centrados con la *lámina*. El ecuador es el círculo comprendido entre los dos trópicos. El Trópico de Capricornio, a pesar de que no está en el hemisferio norte, se suele representar en el astrolabio y, como ya se ha indicado, aparece como un círculo mayor que el propio ecuador. En la práctica, este círculo es el que delimita la dimensión de la *lámina*. No hay necesidad de proyectar círculos más al sur de este trópico. En cuanto al Polo, sigue estando en el centro pero ya no coincide necesariamente con el cenit.
- b) La segunda familia de líneas es la que corresponde a la proyección de las coordenadas horizontales, altura y azimut, para una determinada latitud

geográfica del observador que está claramente indicada en la parte inferior de la lámina. Es precisamente la representación de esta familia de líneas lo que obliga a usar una lámina diferente para cada latitud. Solo con estas coordenadas podemos pasar de una estrella situada en el firmamento a un punto situado en el astrolabio y viceversa. Recordemos que el azimut es el ángulo medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte. Se mide desde el punto cardinal norte en el sentido de las agujas del reloj. Es similar a la longitud sobre la Tierra, pero medida sobre el horizonte en vez de hacerlo sobre el ecuador. La altura del astro es el ángulo que forma este sobre el horizonte celeste. Se mide en grados partiendo del horizonte celeste hacia el cenit. Es similar a la latitud celeste, solo que se mide desde el horizonte en vez de hacerlo desde el ecuador.

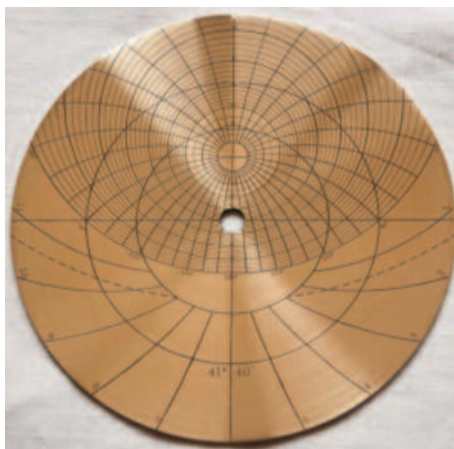


Fig. 8. Lámina real. Latitud  $4^{\circ} 40'$ . A. Llamazares, 2018

La presencia de estas líneas es necesaria porque no debemos olvidar que la lámina se usa para encontrar la posición de los objetos celestes tal como son vistos por un observador situado en una determinada latitud.

Examinemos separadamente el conjunto de líneas de igual altura y el conjunto de líneas de igual azimut (fig. 9).

*Líneas de igual altura.* Es destacable la presencia de la línea con altura nula. Es la línea que une aire y Tierra, a la que llamamos *horizonte*. El horizonte es una línea destacada y muy útil de la lámina, pues nos permite conocer qué astros son visibles y cuáles no en un momento determinado. Cualquier objeto celestial situado por encima del horizonte es visible para el observador y es invisible si está situado por debajo.

La representación de otros arcos circulares de igual altura pero distinta de cero, llamados *almicantarat*, aparecen como curvas circulares, graduadas de diez en diez grados, en el interior del horizonte, pero cuyos centros se van separando del polo. Se representan solo parcialmente porque la proyección estereográfica los lleva más allá del límite de la lámina. Si el horizonte coincidiera con el ecuador, las líneas de igual altura serían círculos concéntricos con el polo. A este horizonte se le llama *horizonte recto*. A los demás horizontes del observador se les llama *horizontes oblicuos*. Es destacable la línea crepuscular y el arco celeste que va desde el horizonte este al horizonte oeste pasan-

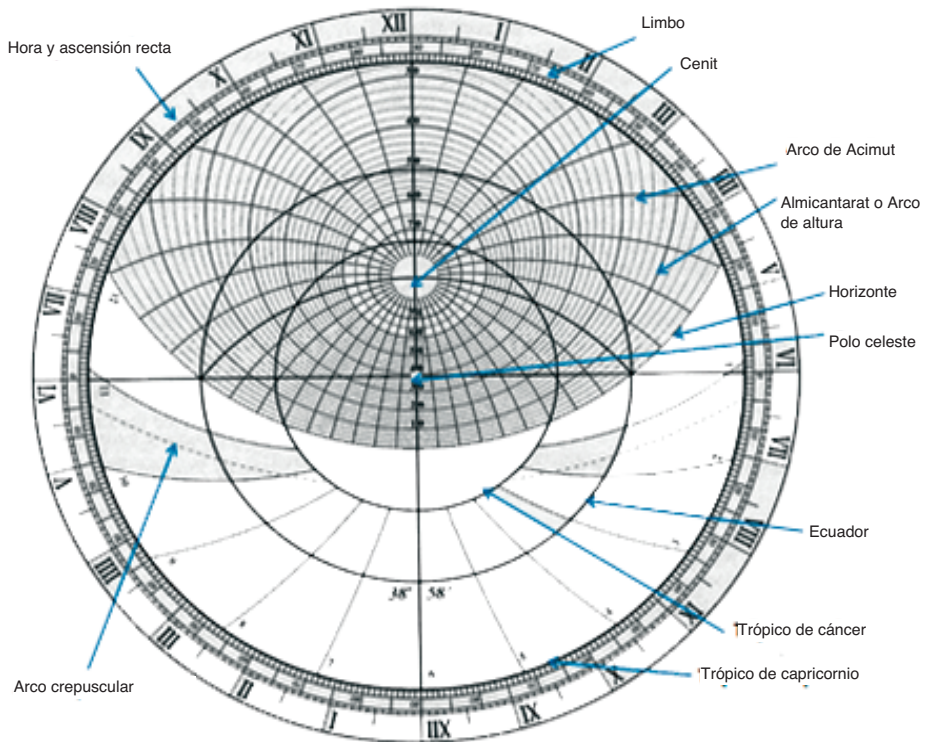


Fig. 9. Esquema de lámina de  $38^{\circ} 58'$

do por el cenit. A este arco se le llama *primer vertical* y viene definido por la intersección de los azimutes de  $90^{\circ}$  y  $270^{\circ}$  con el horizonte.

*Líneas de igual acimut.* Cuando el horizonte coincide con el ecuador celeste, es decir si estamos en el polo, todos los puntos de igual acimut se representan como líneas rectas que salen radialmente desde el polo, en el centro, hacia el borde del astrolabio. Si, como es lo normal, ecuador y horizonte no coinciden, las líneas de igual acimut dejan de ser rectas y se curvan, para ir desde el cenit al borde del astrolabio. Es destacable la línea de  $180^{\circ}$ , representativa del origen de azimutes. Las líneas de igual acimut siguen siendo círculos pero con su centro desplazado, por lo que aparecen como arcos no concéntricos.

El grabado de esta segunda familia de curvas sobre la lámina es la parte más difícil y delicada en la confección del astrolabio. Estas curvas son las que determinan que la lámina sea distinta para cada astrolabio, pues dependen de la latitud escogida.

La lámina es una placa concéntrica con la araña pero, contrariamente a lo que sucede con esta, es una parte fija. No puede girar, ni lo necesita, pues los elementos que en ella se representan no giran ni se desplazan como consecuencia de la rotación de la esfera celeste o de la rotación solar.

Pero la lámina, aunque fija, debe ser intercambiable con láminas correspondientes a otras latitudes del observador. Este es un serio inconveniente del astrolabio estándar que fue relativamente resuelto equipándolo con varios tímpanos para latitudes próximas entre sí. Era frecuente que cada astrolabio fuera acompañado por un conjunto de láminas que cubrían latitudes de dos en dos grados, pero rara vez en número superior a cinco unidades.

Así pues, para confeccionar el mapa del firmamento sobre un plano es necesario:

- a) trasladar a un plano el conjunto de las estrellas fijas con la posibilidad de que este conjunto pueda rotar, para así poder representar el firmamento a lo largo del día en vez de hacerlo simplemente en un instante dado. Aquí se incluye la trayectoria del Sol. Esto se consigue con la araña;
- b) trasladar a otro plano, paralelo con el anterior, el conjunto de líneas geográficas que no sufren transformación como consecuencia de la proyección estereográfica y el conjunto de líneas representativas de las coordenadas horizontales, azimut y altura, que sí sufren modificación con la proyección. Esto se consigue con la lámina.

Que araña y lámina sean dos partes diseñadas en dos planos paralelos no altera el propósito fundamental de representar en un plano, el astrolabio, la información de ambas.

Las curvas que aparecen entre los dos trópicos representan las horas desiguales, llamadas *horas estacionales* o *planetarias*, que son el resultado de dividir por 12 el tiempo transcurrido entre salida y puesta del Sol. Las horas del día son distintas de las de la noche.

Con esta información estamos en condiciones de conocer en cada momento la situación de la estrella y, lo que es esencial, su posición respecto del horizonte del observador. En efecto, girando la araña sobre la lámina podemos determinar la hora en que la estrella cruza el horizonte con lo que, sobre el limbo, vendrá indicada la hora del orto u ocaso.

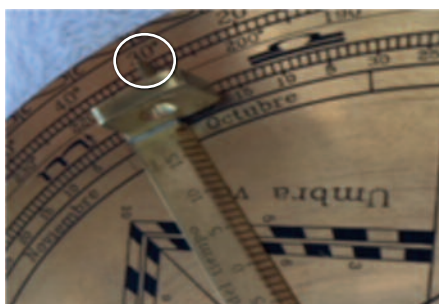
*Madre.* Es la caja circular donde se asientan todos los elementos del astrolabio. En su parte frontal aparecen, en forma concéntrica, la red giratoria, la lámina fija pero cambiabile y un limbo fijo y solidario con el cuerpo de la madre donde se representan los 360° y las veinticuatro horas.

*Parte posterior:* En la parte posterior del astrolabio se encuentra una alidada de pínulas giratoria que sirve para la toma de datos, particularmente para determinar la altura o ángulo de los astros. El ángulo así obtenido es la altura del almicantarát correspondiente, y es en esta curva donde debe situarse el astro mediante el adecuado giro de la araña.

Otra utilidad de la alidada de pínulas es que, mediante un limbo marcado en la parte posterior, donde se señalan las fechas, los grados y las zonas zodiacales, podemos deducir cuál es la longitud del Sol (14) a lo largo de la eclíptica.

---

(14) Llamamos *longitud del Sol* al arco recorrido por este a lo largo de la eclíptica tomando como origen el Punto Vernal o primer punto de Aries en el sentido del Trópico de Cáncer.



1. Situación solar sobre la eclíptica: 210°, Libra 30



2. Traslado de la posición del Sol a la araña



3. Giro de la araña hasta el horizonte, 06h. 40 min

Fig. 10. Caso práctico: ¿a qué hora amanecerá en Zaragoza (latitud  $4^{\circ} 40'$ ) el 20 de octubre de 2018? A las 06h.40 min

*Caso práctico.* Uno de los problemas más comunes que se resuelven con el astrolabio es el de hallar la hora de salida y puesta del Sol para un día determinado del año y para un lugar cuya latitud es coincidente con la de la lámina (fig. 10). El problema se reduce a encontrar la hora en que la posición del Sol sobre su trayectoria se encuentra con la línea representativa del horizonte. La línea del horizonte está claramente diseñada en la lámina, pero no así la posición del Sol para un día dado del año, cuya trayectoria, la eclíptica, se encuentra representada en la araña. Es preciso, pues, averiguar la posición solar con la ayuda de la escala situada en la parte posterior, que da la longitud solar para cada día del año. Una vez determinada la posición del Sol, se traslada esta a la araña poniendo la regla en el punto correspondiente de la eclíptica. El punto de intersección de la regla con la eclíptica nos dará la posición del Sol en la araña.

A partir de ahora operaremos como con las estrellas; basta con girar la araña hasta que el Sol cruce el horizonte. El giro realizado para alcanzar este punto nos marcará sobre el limbo la hora en que el orto u ocaso se produce. Conocidos estos puntos, podremos determinar, además, la altura máxima del Sol, la hora crepuscular, la duración del día o de la noche, etc.



*La azafea*

Azarquiel resolvió la cuestión de la inevitable pluralidad de las láminas necesarias en el astrolabio clásico creando un nuevo tipo de astrolabio llamado *azafea*, también conocida como *ámina*, *Saphea Arzachelis* o *astrolabio universal*.

Recordemos que su explicación y uso se encuentra en el perdido *Tratado de la azafea*, cuya traducción al castellano fue incluida afortunadamente por Alfonso X en su obra *Libros del saber de astrología*. La innovación aportada por Azarquiel consistió en una modificación de la proyección estereográfica que se ha expuesto anteriormente. Mantuvo este tipo de proyección, pero propuso que el plano sobre el que se realizara dejara de ser el plano ecuatorial, que se venía utilizando desde hacía cerca de treinta siglos. En su lugar utilizó un plano meridional de la esfera celeste, es decir un plano que pasa por los polos (fig. 11).

La esfera celeste, como sucede con la esfera terrestre, posee un solo ecuador pero tiene infinitos planos meridionales, todos ellos perpendiculares al ecuador celeste; pero dos de ellos, separados por 90°, son tan singulares como el plano ecuatorial. En efecto, están perfectamente definidos, son fijos en el universo e independientes de la posición del observador, y dividen la esfera celeste en dos semiesferas concretas. A estos planos se les llama *coluro solsti-*

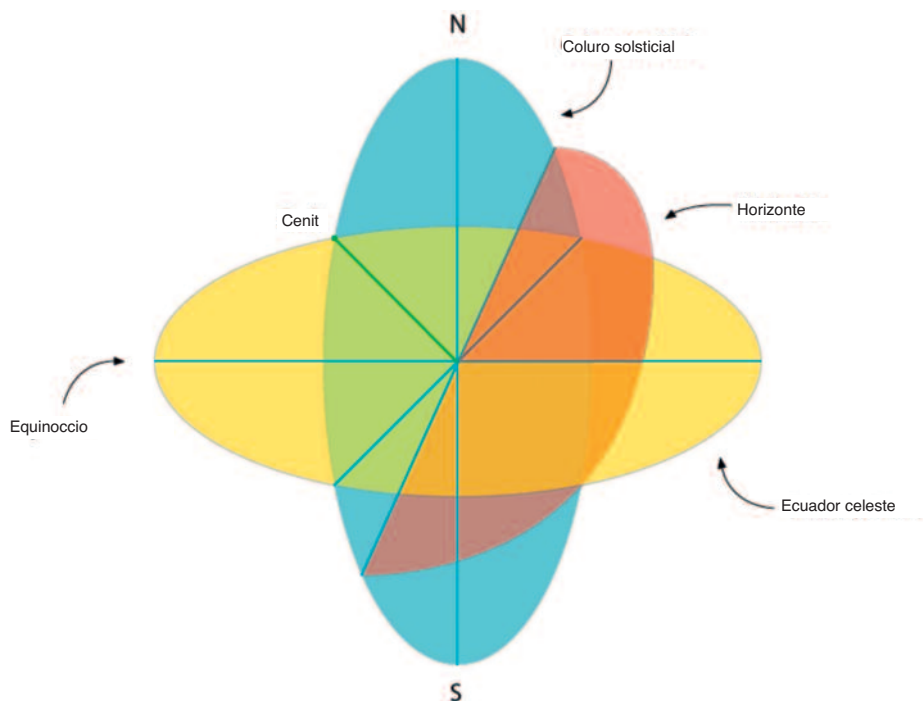


Fig. 11. Azafea. Proyección de la semiesfera lateral sobre el coluro solsticial



Fig. 12. La azafea de Azarquiel, año 1075

*cial y coluro equinoccial*, porque son meridianos que pasan respectivamente por los solsticios y por los equinoccios.

Pues bien, Azarquiel propuso que la proyección estereográfica se hiciera sobre el meridiano que pasa por los solsticios, esto es sobre el coluro solsticial, y que el objeto a proyectar continuara siendo las semiesferas celestes, pero en este caso las semiesferas este y oeste (figs. 12, 13 y 13bis). El coluro solsticial es un plano fijo en el espacio, como el ecuador.

La otra novedad propuesta por Azarquiel fue que el punto de proyección o foco fuera otro punto fijo en el universo, como anteriormente lo era el Polo Sur para el hemisferio norte. No podía elegir el este o el oeste, porque estos



Fig. 13. La azafea de Azarquiel. C. González, año 2018



Fig.13bis. Astrolabio convencional, año 2018. A. Llamazares

puntos cardinales no son puntos fijos del universo como ocurre con los Polos Norte y Sur. El punto fijo escogido fue el *Punto Vernal*, también llamado *equinoccio de primavera*, *primer punto de Aries* o *punto alfa*.

Así pues, la definición correcta y concisa propuesta por Azarquiel sería: «La lámina de la azafea es la proyección estereográfica de un hemisferio de la esfera celeste sobre el coluro solsticial cuyo origen es el Punto Vernal».

No es tan complicado como puede parecer. En el fondo se trata de sustituir en la proyección los hemisferios norte y sur por los hemisferios este y oeste. Podríamos decir que se trata simplemente de una proyección «lateral», pero en realidad es una nueva proyección que cambia casi todo. Vamos a examinar a continuación cuáles son las consecuencias y cuáles las ventajas derivadas de esta nueva proyección.

*Polos.* Se encuentran situados en las partes superior e inferior de la lámina. Recordemos que, en el astrolabio clásico, los polos estaban en el centro de la lámina.

*Ecuador celeste.* Al proyectar el ecuador sobre un plano meridional, se transforma en una recta que lo corta diametral y horizontalmente. El recorrido a lo largo del ecuador se transforma en un recorrido de ida y vuelta sobre esta recta diametral, por lo que cada punto de ella representa dos puntos separados  $180^\circ$ . Un punto de ida representando  $x^\circ$  representa también oro punto de vuelta de  $x^\circ + 180^\circ$ . A esta línea se la solía llamar *línea equinoccial*, por pertenecer al plano ecuatorial o plano equinoccial, como lo llamaban los antiguos.

*Eclíptica.* Corta el plano del astrolabio diametralmente, transformándose también en una recta. La particularidad es que forma un ángulo de  $23,5^\circ$  con la recta representativa del ecuador. El recorrido del Sol sobre ella es también de ida y vuelta a lo largo del año. Pasa a través de los equinoccios y encuentra al borde de la lámina en los trópicos. Basta con girar el astrolabio los  $23,5^\circ$  para transformar la recta del ecuador en la recta de la eclíptica y viceversa. El uso de la azafea muestra una notable versatilidad.

*Horizontes.* La proyección del horizonte es una recta sobre la lámina de la azafea, como ocurre con la eclíptica y con el ecuador, pero esta recta está inclinada respecto del ecuador un ángulo igual a la latitud que posee el observador de cuyo horizonte se trata. En consecuencia, el conjunto de los horizontes viene representado por un haz de rectas que se cruzan en el centro del ecuador y forman con este ángulos iguales a la latitud de aquellos.

La transformación de los horizontes en un haz concéntrico de rectas constituye la novedad más importante y decisiva de las introducidas en el astrolabio por la nueva proyección de Azarquiel.

Que todos los horizontes se representen como rectas que pasan por el centro del universo es una pieza clave de la lámina de la azafea. No es necesario grabar sobre ella los horizontes. Bastaría con montar una regla giratoria sobre la lámina para que, simplemente girándola, marcara el horizonte correspondiente a la latitud deseada. De hecho, así se hace con la *regula*, que por otro lado lleva incorporado un pequeño brazo articulado llamado *bracciolo*, que sirve para indicar la posición de un astro en cualquier punto de la lámina.

*Trópicos.* Con la proyección de Azarquiel, todos los elementos gráficos circulares diametrales se transforman en líneas rectas. Así hemos visto que ocurre con el ecuador, la eclíptica y los horizontes. Pero con las líneas tropicales, que no son diametrales, las líneas proyectadas dejan de ser rectas y de

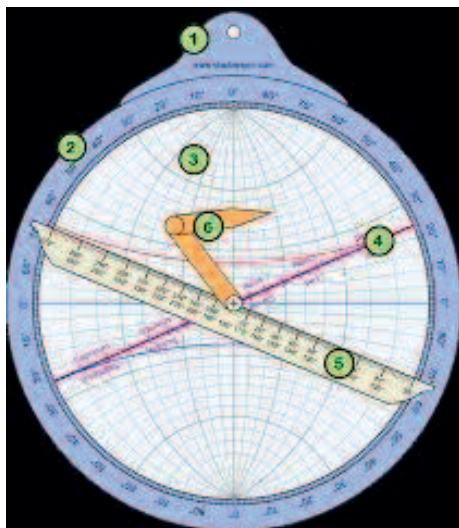


Fig. 14. Partes del astrolabio universal: 1, tronco; 2, limbo, marcado en grados; 3, lámina, con meridianos y paralelos; 4, eclíptica, con signos zodiacales; 5, regla giratoria, marcada en longitud de eclíptica; 6, brazo, que indica la intersección de meridiano con paralelo

horizontales, altura y azimut, para una latitud dada. Para ello se representaban, para cada latitud, sendos haces de líneas, uno para alturas constantes y otro para azimutes constantes. En la azafea se procede igualmente pero tomando como latitud la correspondiente al Polo Norte. Dado que a esta latitud el plano ecuatorial y el horizonte son uno mismo, podríamos decir que en la azafea las coordenadas trasladadas a su plano son las coordenadas ecuatoriales, declinación y ascensión recta o, si se prefiere, meridianos y paralelos. Se representa el haz de paralelos y el haz de meridianos, a los que llamaremos respectivamente *paralelos* y *arcos polares* porque unen los polos (fig. 14).

Es interesante observar que, con esta proyección, los haces de meridianos no necesitan ser modificados cuando el observador cambia de latitud. En vez de modificar los haces respecto de cada horizonte, que sería prácticamente imposible, lo que se hace es rotar el horizonte mediante el giro de la *regula* diametral, que representa la posición de cualquier horizonte, como vimos anteriormente. He aquí la clave de la lámina de Azarquiel: el horizonte puede ser cambiado para la latitud requerida.

Obsérvese también que, girando la azafea un ángulo igual al de la latitud, el ecuador pasa a ser horizonte y el Polo pasa a ser el cenit, con lo que la línea que une polo con ecuador pasa a ser la que une cenit con horizonte, es decir la declinación pasa a ser la altura. De nuevo aparece la versatilidad de la azafea para pasar de un sistema de coordenadas a otro con suma facilidad.

pasar por el Polo. No debe olvidarse que los trópicos pertenecen a la familia de los paralelos, con la única singularidad de que poseen la latitud de  $+25,5^\circ$  y  $-25,5^\circ$ . La proyección de los trópicos corresponde a la de los paralelos de las citadas latitudes, que son las que alcanzan los extremos de la eclíptica. El Trópico de Cáncer conecta con la eclíptica en el solsticio de verano, mientras que el de Capricornio lo hace con el solsticio de invierno.

*Puntos equinocciales.* Vienen representados por la misma línea que representa al ecuador

*Meridiano local.* Corresponde al diámetro vertical. Antiguamente se le definía como *meridiano*.

*Coordenadas celestes.* Este quizá sea el punto más delicado de exponer. Recordemos que en el astrolabio clásico se trata de trasladar a su propio plano las coordenadas hori-

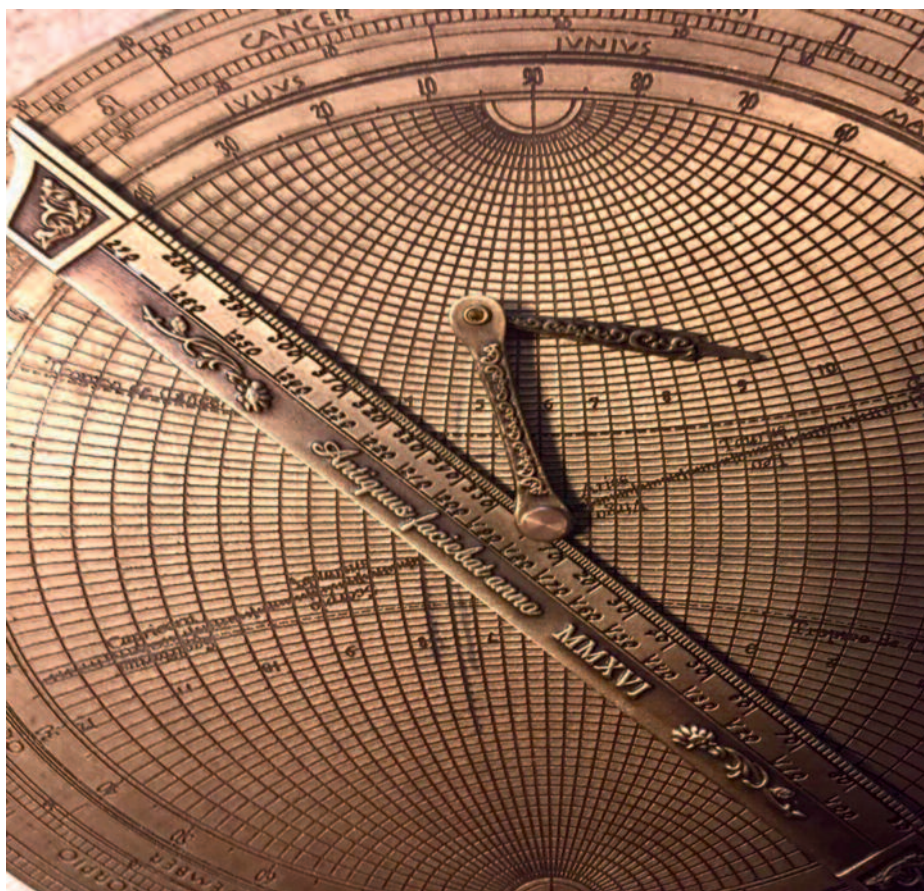


Fig. 15. Cálculo de la hora de salida del Sol en Zaragoza ( $41^{\circ} 41'$ ), el día 20 de octubre de 2018, usando la azafea (C. González, año 2018)

El astrolabio clásico se ha transformado en la azafea, *Saphea Arzachelis*, a la que, por ser útil para todas las latitudes, se la llama «astrolabio universal». Es a partir de la aparición de la azafea cuando se puede hablar de un antes y un después del astrolabio y cuando este adquiere la capacidad de determinar la latitud del lugar, por lo que la azafea podría ser considerada, además, un instrumento náutico.

La resolución de problemas como el cálculo de la hora del orto u ocaso del Sol en cualquier día y en cualquier latitud se hace de forma algo diferente que en el caso del astrolabio clásico, si bien sigue tratándose de hacer coincidir la trayectoria solar diaria con el horizonte. Hay que tener presente que sobre la lámina se representan las líneas de declinación constante, mientras que con el astrolabio convencional se representaban las líneas de altura constante.



Fig. 16. Astrolabio náutico, máxima simplificación del astrolabio universal. Solo conserva de este la alidada de pínulas, para medir la altura de los astros

La ventaja de representar las líneas de declinación constante es que estas, al ser muy pequeña la variación diaria de la declinación solar, pueden tomarse como las líneas que sigue el Sol en su trayectoria diaria, por lo que basta con localizar la posición solar, como se hacía con el astrolabio, para conocer su trayectoria.

La posición del Sol es la que este ocupa en la eclíptica que aparece en la lámina. Basta para conocerla con observar la longitud del Sol que nos da el limbo de la azafea para cada día del año. Posicionado el Sol en el punto adecuado de la eclíptica, se observará cuál es la línea de declinación constante que pasa por ese punto. Esta línea, que es la que recorrerá el Sol durante el día, encontrará el horizonte definido por la regla en un punto dado. El punto de encuentro determinará el arco horario de la lámina que pasa por

él, con lo que nos indicará a qué hora se ha producido ese encuentro y, por consiguiente, a qué hora se produce el orto u ocaso solar (fig. 15).

Así pues, para determinar el encuentro del Sol con el horizonte no ha sido necesario girar ninguna araña, que por otro lado no existe. Basta con determinar la intersección de la línea de declinación constante seguida diariamente por el Sol con la regla que, ahora, representa la posición del horizonte.

*Evolución de los astrolabios.* Una modificación importante la introdujo Juan de Rojas y Sarmiento con su «astrolabio ortográfico», donde se sustituye la proyección lateral estereográfica de Azarquiel por una proyección ortográfica, lo que supone que el polo elegido está en el infinito y los rayos que definen la posición de las estrellas son paralelos entre sí. También introdujo alguna variación de relativa importancia el holandés Jemme Reiners, conocido como Gemma Frisius, con su llamado «astrolabio católico», en el sentido de astrolabio universal, en un fracasado intento de apropiarse de la paternidad del descubrimiento que ya había realizado Azarquiel 400 años antes.

El uso del astrolabio para fines exclusivamente marinos (fig. 16), como la determinación de la altura solar mediante la alidada de pínulas, supuso una progresiva evolución simplificadora hasta convertirlo en un mero cuadrante que recibió el nombre de «astrolabio náutico». A su vez, el cuadrante evolucionó hasta alcanzar el sextante, con la incorporación de un sistema de espejos que introdujo la importante novedad de poder observar simultáneamente la estrella y el horizonte.



*Reconocimientos.* Azarquiel es considerado el mayor astrónomo español de todos los tiempos. Cuatro siglos después de crear sus tablas, Copérnico le citaría manifestando estar en deuda con él. La precisión de las Tablas era tal que Laplace (1749-827), uno de los más destacados matemáticos de la Ilustración, seguía utilizando las observaciones y anotaciones de Azarquiel para realizar los cálculos de las posiciones y predicciones planetarias. Sus tablas fueron un gran legado para la humanidad.

En diciembre de 1864, Maxwell pronunció ante la Royal Society de Londres la conferencia «Una teoría dinámica del campo electromagnético», que contenía sus famosas cuatro ecuaciones reguladoras del campo electromagnético, mostrando que la luz tenía este carácter. Al contemplarlas, un famoso físico de origen austriaco, Ludwig Boltzmann, consideró que esas ecuaciones eran tan bellas, por su simplicidad y elegancia, que se preguntó con admiración: «¿Fue acaso un Dios el que escribió estos signos?». Semejante comentario aludiendo a la intervención divina hicieron los sabios astrónomos de Oriente Medio cuando recibieron de España la azafea. Comentaron que Azarquiel solo pudo realizar ese descubrimiento con el apoyo de la providencia divina.

Sus méritos movieron a la Nasa a bautizar con su nombre un cráter lunar, «Arzakalis».



Fig. 17. Detalle de la sección 33 de la Luna. La hilera central de cráteres está formada por los de Ptolomeo (superior), Alphonsus, en honor de Alfonso X (central), y el cráter Arzakalis

## Bibliografía

- ALFONSO X de CASTILLA: *Libros del saber de la astronomía*, s. XIII (1276-1279). Biblioteca de la Universidad de Santiago de Compostela, sign. 1242.
- BLATEYRON, François: *The universal astrolabe*. Shadows Pro software.
- : *List of problems solved with a universal astrolabe*. Shadows Pro software
- CERVERA, Fernando: *Españoles olvidados. Azarquiel, el cincelador de instrumentos*. Ulüm, Valencia, 2015.
- CLARET, Antonio: *Azarquiel y otras historias. La astronomía en Al-Andalus*. Instituto de Astrofísica de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Granada, ISBN 84-9335574-5-6.
- CUESTA, Mariano, y SURROCA, Alfredo (coords.): *Cartografía medieval hispánica. Imagen de un mundo en construcción*. Real Sociedad Geográfica, Madrid, 2009.
- y —: *Cartografía hispánica. Imagen de un mundo en crecimiento, 1503-1810*. Ministerio de Defensa, Madrid, 2010.
- DORCE, Carlos: *Azarquiel. El astrónomo andalusí*. Nivola, Madrid, 2008.

ALFREDO SURROCA

- GARCÍA FRANCO, Salvador: *Catálogo crítico de astrolabios existentes en España*. Instituto Histórico de Marina, Biblioteca del Museo Naval, Madrid, 1945.
- GLICK, Thomas: *Islamic and Christian Spain in the Early Middle Ages*. Princeton University Press, 1979.
- HERNÁNDEZ PÉREZ, Azucena: *Astrolabios en al-Andalus y los reinos medievales hispanos*. La Ergástula, Madrid, 2018.
- MILLÁS VALLICROSA, J.M.: *Estudios sobre Azarquiel*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Miguel Asín, Madrid, 1943.
- MORRISON, James E.: *The Astrolabe*. Janus, Delaware (EE.UU.), 1978.
- PONS BOIGUES, Francisco: *Ensayo bibliográfico sobre los historiadores y geógrafos árabe-españoles*. Ollero y Ramos Editores, Madrid, 1993 (ed. facs. de la original de 1893).
- PUIG AGUILAR, Roser: «Los tratados de construcción y uso de la azafea de Azarquiel», en *Cuadernos de Ciencias del Instituto Hispano-Árabe de Cultura*. Madrid, 1987.
- (trad.): *Tratado de la azafea*. Instituto Millas Vallicrosa de Historia de la Ciencia Árabe, Barcelona, 1988.
- RICO SINOBAS, Manuel (ed.): *Libros del saber de astronomía del rey D. Alfonso X de Castilla*. Ed. Maxtor, Valladolid, 1978 (ed. facs. de la original de 1867).
- SAMSÓ, Julio: *Las ciencias de los antiguos en al-Andalus*. Fundación Ibn Tufayl de Estudios Árabes-Fundación Cajamar-Ayuntamiento de Roquetas de Mar, Almería, 2012.
- SIMÓN, Elisa: *La azafea de Azarquiel*. Instituto de Estudios Ceutíes, Ceuta, 2018.
- VERNET, Juan: *Lo que Europa debe al Islam de España*. Acantilado, Barcelona, 1999.
- , y SAMSÓ, J.: *Panorama de la ciencia andalusí en el siglo XI. Actas de las Jornadas de Cultura Árabe e Islámica (1978)*. Instituto Hispano-Árabe de Cultura, Madrid, 1981.