

AZARQUIEL, EL ASTROLABIO Y LA AZAFEA. SU APORTACIÓN A LA CIENCIA ASTRONÓMICA Y A LA NAVEGACIÓN DEL RENACIMIENTO

AZARQUIEL, THE ASTROLABE AND THE AZAFEA. HIS CONTRIBUTION TO THE ASTRONOMICAL SCIENCES AND THE NAVIGATION OF THE RENAISSANCE

*Alfredo Surroca**

INTRODUCCIÓN

Dos excepcionales sabios españoles de la Edad Media: Al Zarqali (Azarquiel) y Abrahan Zacuto destacaron tanto por sus obras en sí mismas como por su repercusión en la ciencia mundial, pues el astrolabio universal o azafea y el almanaque perpetuo son 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 y Júpiter, mientras que el astrolabio sólo contempla las posiciones del Sol y las demás estrellas y estas últimas en número inferior a cuarenta. Aunque instrumento y documento, es decir astrolabio y tablas, están íntimamente interconectados y los citados autores traba-

* Real Sociedad Geográfica. alfredo_surroca@yahoo.es

jaron sobre ambos, parece adecuado, para una mayor claridad expositiva y por su especial vinculación, asociar el astrolabio a Azarquiel y las tablas a Zacuto.

CUESTIONES PREVIAS

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

La teoría geocéntrica sostenida por cartógrafos durante la Edad Media y 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 360, o bien los grados 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 utilizada en la actualidad.



Figura 1. Geocentrismo, eclíptica y declinación anual.

Para las necesidades de precisión requeridas en la Edad Media, podía estimarse que la trayectoria y posición del Sol sobre la eclíptica permanecía

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

prácticamente constante para cada momento del año. Esto es, la trayectoria y posición calculada para un año dado, podría mantenerse durante años sucesivos sin que ello supusiera notables errores.

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 *almicantarat*, se corresponde con las líneas o planos que son paralelos al horizonte del observador. Como ocurre con el 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.

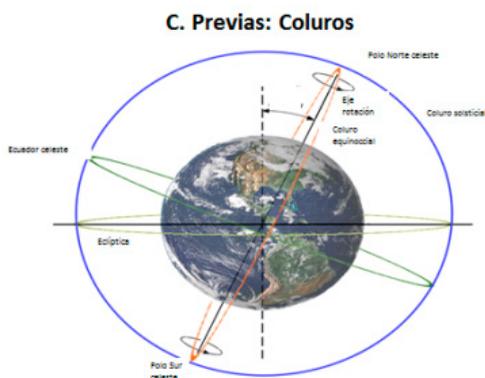


Figura 2. Coluro solsticial y coluro equinoccial.

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 que pueden ser medibles directamente por el observador. Las coordenadas ecuatoriales, declinación y ascensión recta, 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.

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

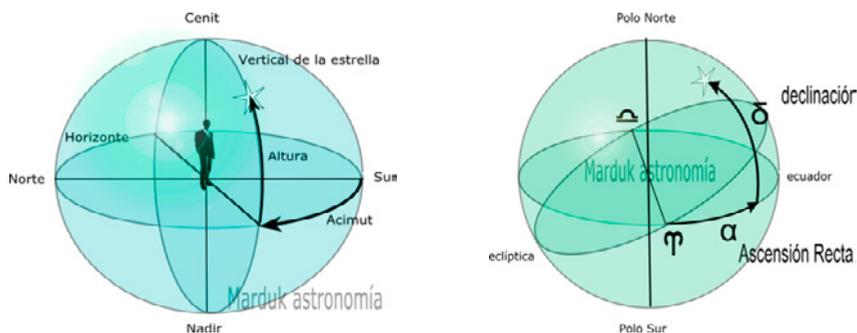


Figura 3. Coordenadas horizontales y ecuatoriales.

AZARQUIEL, VIDA Y OBRA³

Se conocen pocos datos de su vida pero existe una reveladora mini biografía de Azarquiel en la obra de Ishak Israeli: «*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...*».

Azarquiel nació en el año 1030 en Toledo y murió en 1100 en Córdoba.⁴ Siendo muy joven y habiendo mostrados su gran habilidad e inteligencia, el Caid Said al Andalusí, que ejercía la justicia en el reino toledano y era un apasionado por la investigación y 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 18 años, Azarquiel creó un nuevo modelo de astrolabio llamado azafea.⁵ 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*».⁶ La azafea es un instrumento derivado del astrolabio,

³ 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.

⁴ En los libros del saber de Alfonso X se afirma, erróneamente, que murió en Sevilla quizá porque Córdoba formaba parte del reino de Taifa de Sevilla.

⁵ Azafea significa «lámina» que es la parte esencial de los astrolabios.

⁶ Así la describe Alfonso X en los «libros del saber de astronomía».

sólo 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. 400 años después de que la inventara Azarquiel.

Cuando el reino de Toledo fue conquistado por Alfonso VI de León y Castilla en 1085, Azarquiel ya hacía años que 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 terrestre⁷ con sorprendente precisión. Durante decenas de años, se dedicó a catalogar estrellas y planetas y a medir el apogeo solar⁸ 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 Tablas 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, afortunadamente, mandado traducir por el Rey Alfonso X 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 arzakalis o astrolabio universal*, es necesario un conocimiento básico del astrolabio clásico del siglo X que pasamos a exponer.

ASTROLABIO CLÁSICO

Su existencia se acredita desde hace más de 2000 años en Mesopotamia. Durante siglos, se fue desarrollando por numerosos astrónomos, en diversos países hasta adquirir una notable complejidad. Formó parte de los estudios de

⁷ El afelio es el punto más lejano de la órbita de un cuerpo celeste alrededor del Sol.

⁸ Después de estar observando el Sol durante 25 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.

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 el 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 del 927 DC⁹.

El astrolabio (Fig. 4), 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 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 pero 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 contemplando simplemente los astros y el horizonte.



Figura 4. Astrolabio de Al Sahfi. Toledo 1064. MANM.

⁹ 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.

En cuanto para qué sirve, el astrolabio también puede ser considerado como 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 la vía meramente visual, sin utilizar la trigonometría esférica. De él se dice que tiene más de 450 aplicaciones.

Sin embargo, en su versión clásica, ni se diseñó con el fin de ayudar a la navegación ni debe ser considerado como un instrumento náutico.

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 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, sobre 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.¹⁰ El procedimiento de proyección estereográfico 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 como 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 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.

Proyección estereográfica. Hemisferio Norte

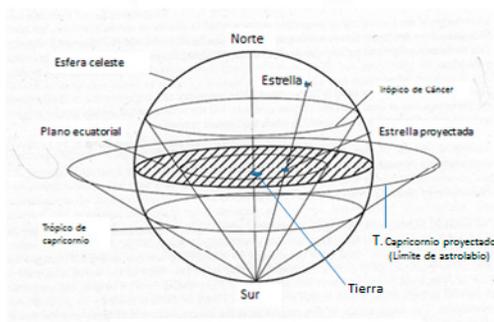


Figura 5. Proyección estereográfica. Hemisferio N.

La elección del plano ecuatorial celeste fue tomada desde muy antiguo. Se podría 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

¹⁰ 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 DC.

¹¹ La fórmula es: $r = R \frac{\cos \delta}{1 + \sin \delta}$ siendo r la distancia buscada δ el ángulo que subtiende la estrella y R el radio arbitrario de la esfera celeste.

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 siguen siendo 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 radio 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 1404¹² cuando aparecen las cartas de navegación planas o cuadradas 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 fuera, 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.

Para no extendernos demasiado 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 sólo la lámina es sustituible.

¹² La geografía de Ptolomeo escrita sobre en el S.I no se descubrió hasta 1404 y fue mandada a traducir al latín y darle forma de mapa por el 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 del ceutí Al Idrisi realizado en Sicilia en 1160 así lo muestra.



Figura 6. Partes del Astrolabio.

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 podría pensarse 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. (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 pues de la representación del firmamento visto por un observador situado en el polo Norte.

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.



Figura 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° alrededor de su centro y, de este modo, representar la posición relativa de las estrellas a lo largo de las 24 horas del día. El valor del giro de la araña se conoce gracias al limbo que, fijo y formando parte de la madre, aparece subdividido en 360° y 24 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 la red. La explicación es que el borde de la red, 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° , basta con girar la araña hasta que el espolón de la estrella coincida con la graduación de 45° señalada en el limbo. El ángulo de giro que hemos realizado, teniendo presente que 15° es 1 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 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. Esta es la razón por la que se debe usar una parte fundamental del astrolabio que contiene las coordenadas. Esta parte es la llamada Lámina.

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:

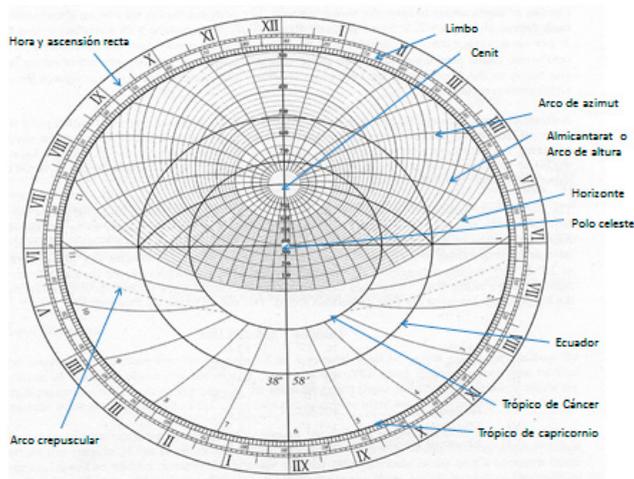


Figura 8. Lámina real. Latitud $41^\circ 40'$. Llamazares. 2018.

Una de ellas es la que resulta de la proyección de 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 Cénit.

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. Sólo 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 el astro sobre el horizonte celeste. Se mide en grados partiendo del horizonte celeste hacia el cénit. Es similar a la latitud celeste sólo que se mide desde el horizonte en vez de hacerlo desde el ecuador.

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 cuales 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 almicantarats, aparecen como curvas circulares, graduadas de diez en diez grados, en el interior del horizonte pero cuyos centros se van se-

parando del polo. Se representan solo parcialmente porque la proyección este-reográfica 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 pasando por el Zénit. A este arco se le llama *primer vertical* y viene definido por la intersección de los azimutes de 90° y 270° con el horizonte.

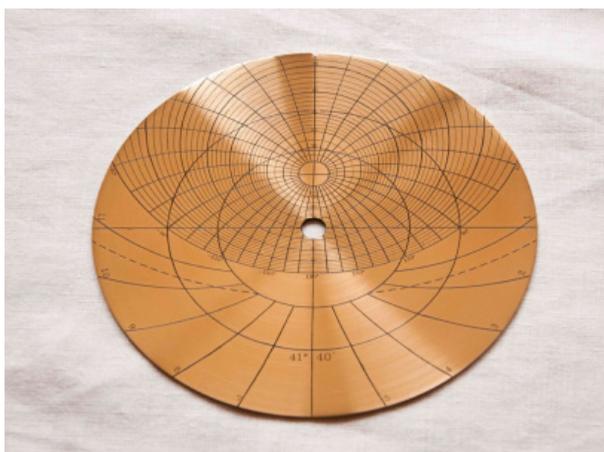


Figura 9. Esquema de Lámina $38^\circ 58'$.

Líneas de igual azimut. Cuando el horizonte coincide con el ecuador celeste, es decir si estamos en el polo, todos los puntos de igual azimut 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 azimut dejan de ser rectas y se curvan para ir desde el cenit al borde del astrolabio. Es destacable la línea de 180° representativa del origen de azimutes. Las líneas de igual azimut siguen siendo círculos pero con su centro desplazado por lo que aparecen como arcos de círculos 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 2 en 2 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 la araña y lámina sean dos partes diseñadas en dos planos paralelos no altera el propósito fundamental de representar en un único plano, el del astrolabio, la información en ellas contenida.

Las curvas que aparecen entre los dos trópicos representan las horas desiguales también llamadas horas estacionales o planetarias que son el resultado de dividir por 12 el tiempo transcurrido entre la salida y la puesta del Sol. Su valor es, por consiguiente, distinto para cada época del año y las horas del día no son iguales a las horas 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 cambiable y un limbo fijo y solidario con el cuerpo de la madre donde se representan los 360° y las 24 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 almicantrat 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 cual es la longitud del Sol¹³ a lo largo de la eclíptica.

LA AZAFEA

Azarquiel, resolvió la cuestión de la inevitable pluralidad de láminas necesarias en el astrolabio clásico creando un nuevo tipo de astrolabio llamado Azafea, también llamada la Lámina, Saphea Arzakalis o Astrolabio Universal.

Recordemos que su explicación y uso se encuentra en el perdido tratado de la Azafea de Azarquiel cuya traducción al castellano fue incluida afortunadamente por Alfonso X en su obra *Los 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, como se venía utilizando desde cerca de 30 siglos. En su lugar, utilizó un plano meridional de la esfera celeste, es decir, un plano que pasa por los polos (Fig. 10).

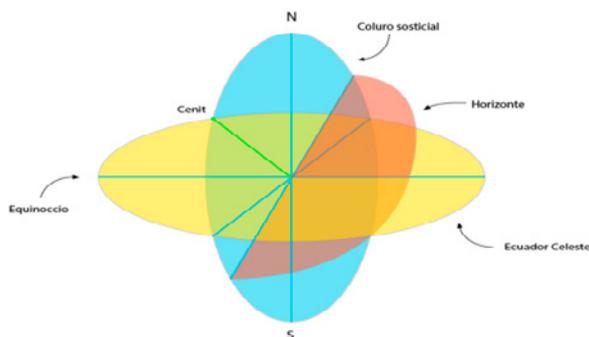


Figura 10. Azafea. Proyección de la semiesfera lateral sobre el coluro solsticial.

¹³ Llamamos «longitud del Sol» al aro 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.

La esfera celeste, como sucede con la esfera terrestre, posee un solo ecuador pero tiene infinitos planos meridionales y todos ellos perpendiculares al ecuador celeste pero dos de ellos, separados por 90° , son tan singulares como lo es el plano ecuatorial. En efecto, están perfectamente definidos, son fijos en el universo, son independientes de la posición del observador y dividen la esfera celeste en dos semiesferas concretas. A estos planos se les llama coluro solsticial 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, Fig. 11 y 12. El coluro solsticial es un plano fijo en el espacio como lo es el ecuador.



Figura 11. La Azafea de Azarquiel. 1075.



Figura 12. La Azafea de Azarquiel. C. González, 2018.

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 *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 lo 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, cuales son las consecuencias y 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 lo 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° . Un punto de ida representando x° representa también otro punto de vuelta de $x^\circ + 180^\circ$. A esta línea se le solía llamar *línea equinoccial* por pertenecer al plano ecuatorial o plano equinoccial, como lo llamaban los antiguos.

Eclíptica. Corta al 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 formando 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 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 trópico 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 quizás sea el punto más delicado de exponer. Recordemos que en el astrolabio clásico se trata de trasladar a su propio plano las coordenadas horizontales, altura y azimut, para una latitud dada. Para ello se representaba, 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. 13).

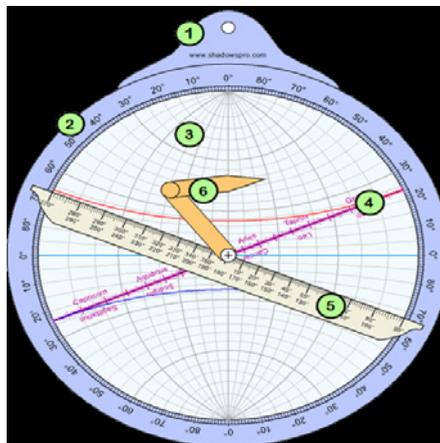


Figura 13. 1 Trono; 2 Limbo. Marcado en grados; 3 Lámina. Con meridianos y paralelos. 4 Eclíptica. Con signos zodiacales; 5 Regla. Giratoria marcada en longitud de eclíptica. 6 Brazo. Indica intersección de meridiano con paralelo.

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 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.

El astrolabio clásico se ha transformado en la Azafea, Sapheta Arzachelis que, por ser útil para todas las latitudes, se le 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 esta adquiere la capacidad de determinar la latitud del lugar, por lo que la Azafea podría ser considerada, además, como 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 al 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.

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 del Sol, 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 cual 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. 14).

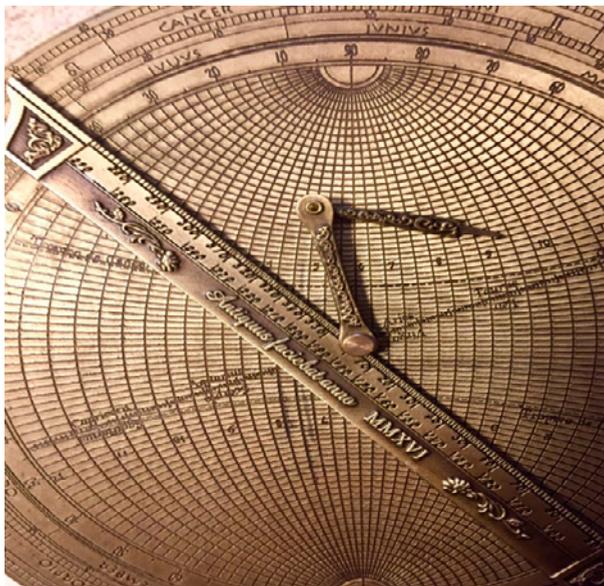


Figura 14. Cálculo la hora de salida del Sol en Zaragoza ($41^{\circ} 41'$) el día 20 de octubre de 2018 usando la azafea.

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 en donde 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. 15), como es 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 marino. A su vez, el cuadrante evolucionó

hasta alcanzar el sextante con la importante incorporación de un sistema de espejos que introdujo la importante novedad de poder observar simultáneamente la estrella y el horizonte.



Figura 15. Astrolabio náutico. Máxima simplificación del astrolabio universal. Sólo se conserva la alidada de pínulas para medir la altura de los astros.

Reconocimientos. Azarquiel es considerado como el mayor astrónomo español de todos los tiempos. Cuatro siglos después 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 de Azarquiel a toda 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 austríaco, 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 comenta-

rio aludiendo a la intervención divina hicieron los sabios astrónomos de oriente medio cuando recibieron de España la Azafea. Comentaron que Azarquiel sólo pudo realizar ese descubrimiento con el apoyo de la providencia divina.

Sus méritos alcanzados, movieron a la Nasa a bautizar con su nombre el cráter lunar.

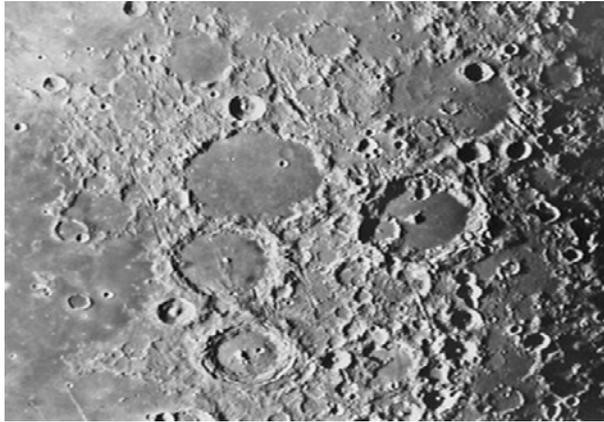


Figura 16. Detalle de la sección 33 de la Luna. La hilera central de cráteres está formada por los de Ptolomeo (superior), Alphonsus, en honor de Alfonso X (central) y el cráter Arzackalis (inferior). CONSOLIDATED LUNAR ATLAS.

RESUMEN

AZARQUIEL, EL ASTROLABIO Y LA AZAFEA. SU APORTACIÓN A LA CIENCIA ASTRONÓMICA Y A LA NAVEGACIÓN DEL RENACIMIENTO

Este artículo analiza el astrolabio y la azafea, sus peculiaridades, partes y fundamentos como instrumentos ampliamente utilizados en tiempos pasados, que permiten orientarse midiendo la altura de los astros. El primero, conocido desde la antigüedad obliga a hacer las observaciones desde una latitud concreta. La azafea, también llamada astrolabio universal, permite en cambio hacer observaciones desde cualquier latitud terrestre. Este importante avance fue debido al astrónomo hispano musulmán Azarquiel, que vivió en el siglo XI entre Toledo y Córdoba.

Palabras clave: Azarquiel, Astrolabio, azafea, latitud terrestre.

ABSTRACT

AZARQUIEL, THE ASTROLABE AND THE AZAFEA. HIS CONTRIBUTION
TO THE ASTRONOMICAL SCIENCES AND THE NAVIGATION OF THE
RENAISSANCE

This article analyzes the astrolabe and the azafea, its peculiarities, parts and foundations as instruments widely used in past times, which allow orientation by measuring the height of the stars. The first, known since antiquity, obliges us to make observations from a specific latitude. The azafea, also called universal astrolabe, allows instead to make observations from any Earth latitude. This important advance was due to the Muslim astronomer Azarquiel, who lived in the 11th century between Toledo and Córdoba.

Key words: Azarquiel, Astrolabe, Azafea, terrestrial latitude.