

La esfera armilar

Un antiguo instrumento astronómico

En latín, *armilla* significa aro, anillo o brazaete. De ahí provino el nombre de *esfera armilar*, usado para designar a un modelo o representación en tres dimensiones de la esfera celeste, la trayectoria aparente del Sol en el cielo y algunos elementos astronómicos significativos como

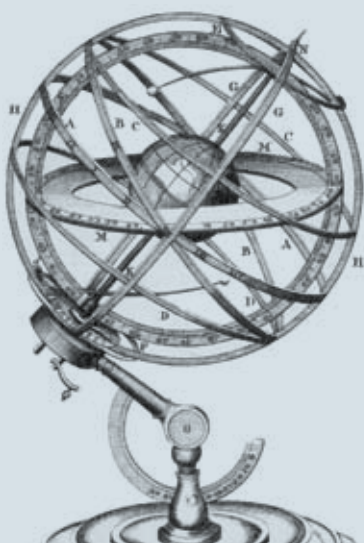


Figura 1. Una esfera armilar de 1771 construida para el hemisferio norte y regulada para aproximadamente 50 grados de latitud. Sus partes son: A, trayectoria del Sol en los equinoccios o línea del ecuador celeste; B, eclíptica, con la indicación de dónde está el Sol en cada mes; C, trayectoria del Sol en el solsticio de verano o trópico de Cáncer; D, trayectoria del Sol en el solsticio de invierno o trópico de Capricornio; E, círculo polar ártico; F, círculo polar antártico; G, coluro o círculo máximo equinoccial; H, coluro o círculo máximo solsticial; K, eje de rotación de la Tierra; M, plano del horizonte; N, polo norte celeste.

el ecuador, los trópicos, los círculos polares celestes y la eclíptica. El adminículo consiste en un conjunto de aros concéntricos dispuestos en torno a una pequeña esfera que hace las veces de la Tierra (figuras 1 y 2). Data de antiguo: su invento se atribuye, entre otros, a Eratóstenes de Cirene (276-195 a.C.), astrónomo, matemático y geógrafo griego que vivió principalmente en Alejandría, cuya célebre biblioteca dirigió.

En la antigua Grecia, lo mismo que en China, donde para algunos apareció por primera vez, o en Persia, la esfera armilar sirvió para realizar observaciones y cálculos de determinadas magnitudes astronómicas, entre ellas el ángulo del ecuador con la eclíptica. Como instrumento científico también la usaron los árabes, quienes desde Andalucía la introdujeron en Europa occidental, donde el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) fue uno de los que hizo extenso uso de ella. De hecho, hasta la invención del telescopio óptico en el siglo XVII fue el instrumento astronómico por excelencia, al punto de que aparece como recurso para dar prestigio a la ambientación de numerosas pinturas del Renacimiento, por ejemplo, *San Agustín en su gabinete*, un fresco de Sandro Botticelli (1445-1510) en la iglesia de Todos los Santos de Florencia (figura 3).

Un atractivo recurso didáctico

Las antiguas esferas armilares son mecanismos sumamente ingeniosos y resultan objetos muy atractivos a la vista. Presentarlas en un contexto escolar da pie para poner de manifiesto ambas características, pero tiene una virtud más importante para

el trabajo del profesor en el aula: permite guiar a los alumnos por el itinerario histórico de la ciencia, desde las primeras intuiciones e ideas que se fueron concibiendo sobre la geometría del cosmos hasta las concepciones más modernas que las superaron. Es, por ejemplo, un recurso valioso para apreciar el valor de la visión ptolemaica (o geocéntrica) del cosmos y evitar la tentación de ponerla en ridículo frente a la copernicana (o heliocéntrica). Entender cómo se llegó de una a la otra después de muchos siglos es un recorrido que resulta natural para los estudiantes, que parten de una situación, si no de ignorancia, por lo menos de mirada ingenua, en algunos aspectos comparable a la de la humanidad ilustrada de hace a veces no tantos siglos.

El trabajo didáctico con la esfera armilar es un buen complemento del que describi-



Figura 2. Lámina de la *Encyclopédie* de Diderot y D'Alembert, 1751, que muestra una esfera armilar.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Un antiguo instrumento astronómico que puede emplearse hoy como recurso didáctico en la escuela, y la forma de trabajar con él en el aula.



Figura 3. A la derecha, Sandro Botticelli, *San Agustín en su gabinete*, fresco de 152 x 112cm, ca. 1480, iglesia de Todos los Santos, Florencia. Advértase la esfera armilar a la izquierda. Arriba, detalle de la esfera armilar.



mos en un artículo de esta revista que recomendamos leer junto con este. Sugerimos en la otra nota (A Gangui, MC Iglesias y CP Quinteros, 'El movimiento de las sombras', CIENCIA HOY, 19, 110: 48-56, abril-mayo de 2009) construir una maqueta que represente el movimiento diurno aparente del Sol. La figura 4 muestra esa maqueta.

Un modelo mental que mantiene su utilidad

El concepto que subyace tanto en esa maqueta como en la esfera armilar es el de la *bóveda celeste*, una representación mental del cosmos como una esfera en cuyo centro está la Tierra que habitamos (o alternativamente, el Sol, alrededor del cual se traslada anualmente nuestro planeta). Esa fue la manera de entender la geometría del cosmos y la base de la astronomía de posición desde la Antigüedad hasta bien entrada la Edad Moderna, y para muchos propósitos es un modelo mental que aún nos resulta útil.

Como se aprecia en la figura 5, nosotros miramos la bóveda celeste desde su interior y vemos todos los cuerpos celestes localizados en algún punto de la superficie de la esfera. Podemos precisar la ubicación de cada uno mediante alguna definición convencional de sus coordenadas. Por la rotación de la Tierra, vemos girar la esfera entera alrededor de nosotros, y describir una rotación completa cada aproximadamente 24 horas (un poco menos en realidad, ya que esta ro-

tación se cumple en 23 horas y 56 minutos, aproximadamente, lo que corresponde al llamado día sidéreo). El eje de esa rotación, llamado también *eje del mundo*, es la línea que pasa por los polos norte y sur de la Tierra y se prolonga hasta alcanzar la superficie de la bóveda; así determina el *polo norte celeste* y el *polo sur celeste*. Equidistante entre ambos polos celestes sobre la esfera está la circunferencia del *ecuador celeste*, determinada por la proyección en el cielo de la circunferencia del ecuador terrestre.

Otra gran circunferencia definida sobre la esfera es la *eclíptica*, que es más difícil de entender intuitivamente. Corresponde al recorrido aparente del Sol, visto desde la Tierra contra el telón de fondo de las estrellas, no en un día sino en un año. Otra manera de imaginarse la eclíptica es como la intersección de la bóveda celeste y el plano determinado por el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Las estrellas del mencionado telón de fondo que veríamos de día detrás del Sol en cada mes son las que forman las constelaciones del zodíaco que están detrás –o por las que 'pasa'– el Sol cada día. Como es obvio, escribimos 'veríamos', porque en realidad la luz del Sol nos impide verlas, y de noche, o durante el crepúsculo, no distinguimos esas constelaciones sino las que se en-

cuentran apartadas por lo menos un par de constelaciones a cada lado de la ubicación real del Sol (en general, llegan a verse bien diez de las trece constelaciones del zodíaco, entre las que por supuesto también hemos incluido la constelación de Ofiuco, que se halla entre Escorpio y Sagitario).

En la figura apreciamos que el ecuador celeste y la eclíptica, al cortarse, determinan dos puntos. Como se podrá apreciar mejor enseguida, al analizar la esfera armilar, son los dos momentos del año en que el Sol está en el ecuador celeste, es decir, los equinoccios, que ocurren en el comienzo de la primavera y del otoño de cada año.

Las coordenadas que mencionamos, usadas para establecer la posición en el cielo de cualquier cuerpo celeste, se suelen definir con relación a ciertos planos fundamentales, que pueden ser el ecuador, la eclíptica o el horizonte del lugar, y medirse por magnitudes angulares, en grados (y sus fracciones). Las coordenadas ecuatoriales se llaman *ascensión recta* y *declinación*; las eclípticas, *latitud* y *longitud celestes*; las horizontales, cuya validez es solo local, *azimut* y *altura*. En el caso particular de la *ascensión recta*, y dado que la Tierra completa un giro de 360 grados angulares respecto de las estrellas del cielo en 24 horas sidéreas (que tienen 4 minutos menos que las 24 horas reloj), esta coordenada acostumbra medirse también en horas, minutos y segundos sidéreos.

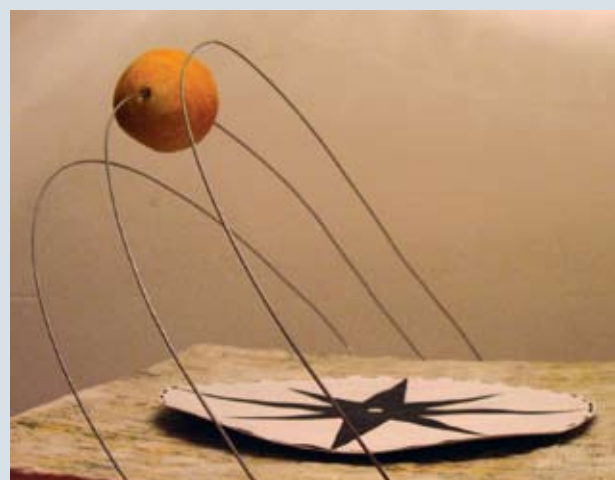


Figura 4. Maqueta que muestra la trayectoria aparente del Sol por la bóveda celeste en tres días del año. La esfera ensartada en uno de los alambres representa al Sol y se puede mover para simular su posición en el cielo en las diferentes horas del día: cuando alcanza el punto más alto indica el mediodía solar. Se puede suponer que, interpretando que se trate del hemisferio sur (y para una latitud al sur del trópico de Capricornio), los arcos semicirculares de alambre corresponden respectivamente (de izquierda a derecha) al solsticio de invierno, ambos equinoccios y el solsticio de verano. En este caso, la maqueta está orientada con el punto cardinal norte hacia la izquierda de la imagen; de hecho, en el hemisferio sur, los arcos diurnos solares (los alambres) se inclinan hacia el norte.

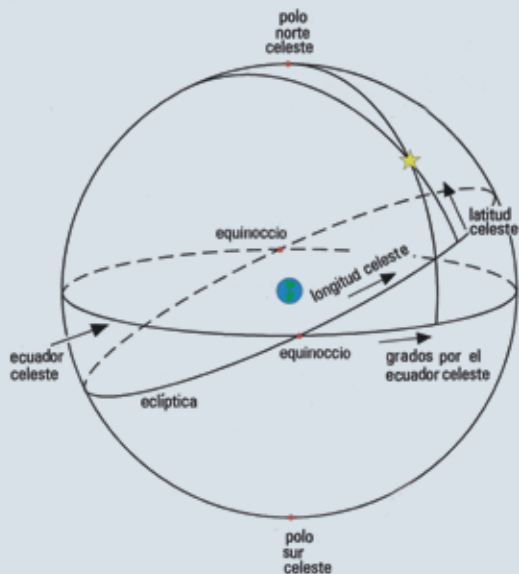


Figura 5. La esfera celeste.

Esfera armilar simplificada para el aula

Para trabajar en clase con la esfera armilar es aconsejable usar un modelo simplificado, como el que muestra la figura 6, construido por Carlos Alberto Páez, diestro artesano y antiguo alumno de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, en colaboración con Roberto Casazza. Como se aprecia, consta de una bolilla central, que hace las veces de la Tierra, y de un conjunto de aros metálicos que la rodean. El eje de rotación de la Tierra sostiene el conjunto y va atornillado al mayor de los aros metálicos. El eje de la Tierra está levantado unos 35 grados del plano horizontal, dado por la mesa o superficie de apoyo. Eso corresponde a la latitud de la ciudad de Buenos Aires y puede variarse para representar el movimiento del cielo en cualquier latitud terrestre.

Figura 6. Dos vistas de un modelo simplificado de esfera armilar.



El aro metálico más grande corresponde al meridiano del lugar para el que se calibre la esfera y define un plano vertical que pasa por los dos polos. El momento en que, en su viaje diurno, el Sol pasa de un lado al otro de ese aro es el mediodía solar. Por eso se habla a veces de horas AM (antes meridiano) y PM (pasado meridiano), para designar a las de la mañana y la tarde respectivamente.

Calibrada la esfera armilar como lo muestra la foto, la parte alta del eje de rotación de la Tierra apunta al polo sur celeste, que en la latitud de Buenos Aires se halla precisamente a unos 35 grados de altura sobre el horizonte en la dirección del punto cardinal sur. Habiendo colocado el hemisferio sur de la Tierra hacia arriba, la estrella polar (*Polaris*), que indica la dirección del polo norte celeste, queda por debajo del horizonte dado por la mesa.

Considérense ahora los dos aros que están algo inclinados entre ellos (unos 23,5 grados angulares), y que podemos imaginar como dos circunferencias proyectadas sobre la bóveda del cielo. El aro que define un plano exactamente perpendicular al eje del mundo es el ecuador celeste: adviértase que corta el horizonte exactamente en los puntos cardinales este y oeste. El otro es la eclíptica. Como podemos apreciar, nuestra esfera armilar permite representar el movimiento aparente del cielo, tanto diurno como anual, para un observador terrestre considerado fijo e inmóvil en el centro del cosmos (el centro del instrumento). Nos proporciona, pues, la clásica representación geocéntrica del mundo, igual que la maqueta de la figura 4.

Si consideramos el aro de la eclíptica, veremos que a cada día del año le corresponde un lugar preciso en el que detrás del Sol se verían determinadas constela-



Figura 7. Esfera armilar regulada para los habitantes del hemisferio sur y para indicar la posición del Sol a mediodía en el solsticio del verano austral.

ciones, las del zodiaco para ese día. El lugar de cada día está muy próximo al del día siguiente: del orden de un grado angular, pues la vuelta completa (360 grados) del Sol por el telón de fondo de las estrellas acontece en aproximadamente un año (unos 365 días). A medida que, día tras día, el Sol se desplaza por el aro de la eclíptica, su alejamiento del aro ecuatorial también cambia, ya que ambos aros no son paralelos. Ese alejamiento se mide con la mencionada declinación.

Cuando el Sol se desplaza hacia el norte del ecuador, durante la primavera y el verano del hemisferio norte (y las estaciones opuestas en el hemisferio sur), su declinación es por convención de signo positivo, mientras que adquiere signo negativo cuando, en la primavera y el verano del hemisferio sur, se desplaza hacia el sur del ecuador. Se deduce de lo anterior que cuando el Sol se encuentra justo en el cruce de ambos aros, es decir, cuando se halla sobre el ecuador celeste, su declinación es cero. Es lo que sucede las dos veces al año que indicamos, en los equinoccios. En el mediodía solar de esos dos días



Figura 8. Esfera armilar regulada para mostrar las posiciones del Sol vistas por un habitante de Buenos Aires en distintas horas del solsticio de verano austral.



Figura 9. Esfera armilar regulada para mostrar las posiciones del Sol vistas por un habitante de Buenos Aires en distintas horas del solsticio de invierno austral.

el Sol está justo en el cenit de los habitantes de la línea ecuatorial de la Tierra.

En la figura 7, en la que se ve una bolilla anaranjada que representa el Sol, la esfera armilar ha sido regulada para el solsticio de verano del hemisferio sur, cuando el sol alcanza el punto más alejado del ecuador o su declinación máxima, que es $-23,5$ grados, porque, por convención, la declinación es negativa hacia al sur y positiva hacia el norte: en el solsticio de verano del hemisferio norte es de $+23,5$ grados. Se puede apreciar que la esfera armilar está orientada de modo que el polo sur celeste se ubique hacia arriba y, por ende, el polo norte celeste quede hacia abajo, tal como quedan ambos polos para los habitantes del hemisferio sur.

Si se hace girar la parte móvil del aparato alrededor del eje del mundo (véase la figura 6), se ve que el Sol describe un arco en el cielo: emerge del horizonte oriental, se eleva, llega a su punto culminante, comienza a descender y finalmente se oculta por debajo del horizonte occidental, como lo muestra la secuencia de imágenes de la figura 8. El arco descrito es similar al mostrado por el aro superior o de la derecha (el más largo) de la maqueta de la figura 4, que corresponde precisamente al movimiento diario del Sol el día del solsticio de verano austral. Ese día, en el hemisferio sur el Sol emerge del horizonte al sur del punto cardinal este, y se pone al sur del oeste.

Si ahora regulamos la esfera armilar para representar el solsticio de invierno austral, en el que el Sol alcanza la declinación positiva máxima ($+23,5$ grados),

y repetimos la serie de fotografías, obtendremos la secuencia de la figura 9. Para un observador ubicado en el hemisferio sur, en Buenos Aires por ejemplo, el arco recorrido por el Sol descrito a lo largo de ese día será el más corto del año y corresponderá al aro más corto de la maqueta de la figura 4.

Se deduce de lo explicado hasta acá que cuando el Sol está en el sitio medio de su trayectoria a lo largo de la eclíptica, es decir cuando su declinación es igual a cero y se encuentra en los puntos equinocciales, su arco diario está representado por el aro intermedio de la maqueta y por el ecuador celeste de la esfera armilar. En efecto, esos dos días por año el Sol recorre el ecuador celeste, lo que significa que quienes viven sobre la línea del ecuador terrestre lo tienen exactamente sobre sus cabezas (en el cenit) a mediodía de esas fechas. Además, esos días de equinoccio, por razones de simetría, todos los habitantes del planeta tendrán noches de doce horas y otras doce horas con el Sol por encima del horizonte.

Palabras finales

La construcción de ambos dispositivos presentados en esta nota puede representar una actividad instructiva para que el profesor lleve adelante con sus alumnos. La maqueta con los arcos solares de alambre es sin duda algo simple de fabricar. Quizá un poco más difícil sea reconstruir el modelo simplificado de la esfera armilar. Sin embargo, con las indicaciones dadas y habiendo entendido cabalmente el significado de cada una de sus partes (los aros metálicos correspondientes al meridiano del lugar, al

ecuador celeste, a la eclíptica y el eje del mundo) el diseño de este aparato no es imposible de abordar.

Si no se tiene la capacidad de manipular metales y soldaduras, puede asimismo intentarse su construcción con alambres rígidos doblados, como los empleados en la maqueta. Otra opción es usar una rueda de bicicleta (cuyo perímetro y eje serán el ecuador celeste y el eje del mundo, respectivamente) a la que puede agregarse, inclinado, un alambre o aro circular de igual perímetro, que representará a la eclíptica. Si un alumno sostiene con ambas manos el eje de la rueda, inclinándolo respecto de la horizontal un ángulo igual al de la latitud de la ubicación de su escuela, y otro se encarga de ir cambiando la posición del Sol a lo largo del aro inclinado, pueden representarse simplemente las trayectorias diurnas del Sol para cualquier día del año.

Jamás escasean elementos simples para trabajar los movimientos de los astros en el aula; basta comprender lo que se quiere representar. Esta nota intentó ayudar a construir esa comprensión. **CH**



Alejandro Gangui

Doctor en astrofísica, Escuela Internacional de Estudios Avanzados, Trieste.
Investigador independiente del Conicet.
Profesor adjunto, FCEYN, UBA.
Miembro del Centro de Formación e Investigación en la Enseñanza de las Ciencias, FCEYN, UBA.
gangui@df.uba.ar
cms.iafe.uba.ar/gangui