

¿Cuán errante en torno a la Tierra se desplaza el Sol?

¿Sale el Sol por el este?

Si les preguntara a varios amigos por dónde esperan ver la salida del Sol al amanecer, probablemente la mitad de las respuestas recibidas sería: 'Por el este'. Por supuesto, sucedería algo similar con la puesta del Sol y el oeste. Sin embargo, la salida y la puesta del Sol prácticamente nunca suceden en esos precisos puntos cardinales: las contestaciones solo serían estrictamente ciertas en los equinoccios, es decir, los días cuando empiezan el otoño y la primavera. Todos los demás días del año el Sol sale y se pone a cierta distancia de, respectivamente, el este y el oeste. Esa distancia, además, varía según el día y la latitud.

En esta nota describiremos un instrumento simple para determinar la desviación angular de la dirección este-oeste -hacia el norte o el sur- del punto del horizonte por el que sale y se pone el Sol. El instrumento, que no requiere hacer cálculos matemáticos, ha demostrado ser un recurso pedagógico valioso en cursos introductorios de física y astronomía, y puede resultar útil a los profesores de enseñanza secundaria.

Es bien sabido que el Sol no sale todos los días a la misma hora, lo mismo que tampoco se pone a la misma hora todos los días del año. Mis amigos interrogados me aclararían sin duda que las horas de salida y puesta del Sol varían con el trans-

curso de los meses. A poco que prestemos atención, advertiremos cambios, incluso, de una semana a otra. También es sabido que a mediodía (estrictamente, en el mediodía solar), en verano el Sol está alto por sobre el horizonte, y está más bajo en invierno. Vemos al Sol describir diariamen-

te en el cielo una trayectoria (un arco de circunferencia) como consecuencia de la rotación de nuestro planeta alrededor de su eje. Esos arcos solares que vemos al Sol describir en el cielo (cada día con pequeñas diferencias con relación al anterior) están contenidos en planos perpendicula-

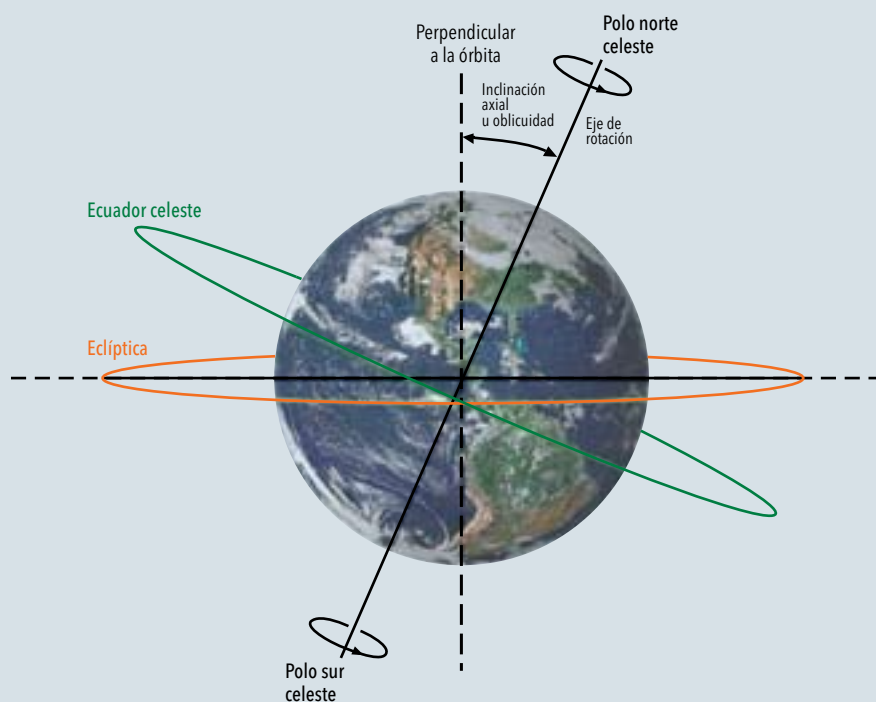


Figura 1. La Tierra como la vería un lejano observador ubicado sobre el plano de la traslación del planeta o la eclíptica (por ejemplo, desde el Sol), el 21 de marzo de cada año (suponiendo que el sentido de traslación de la Tierra sea hacia la izquierda de la imagen). Para un terrícola, la elipse verde indica el plano del ecuador celeste, que es la prolongación a la bóveda del cielo del ecuador terrestre. El eje de rotación de la Tierra -que, prolongado a encontrarse con esa bóveda, marca los polos norte y sur celestes- está inclinado $23,5^\circ$ con respecto a la perpendicular a la eclíptica.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Se propone un instrumento de construcción simple que permite entender cómo es exactamente la trayectoria aparente del Sol en el cielo para distintos puntos de la Tierra y a lo largo del año, y por qué es así.

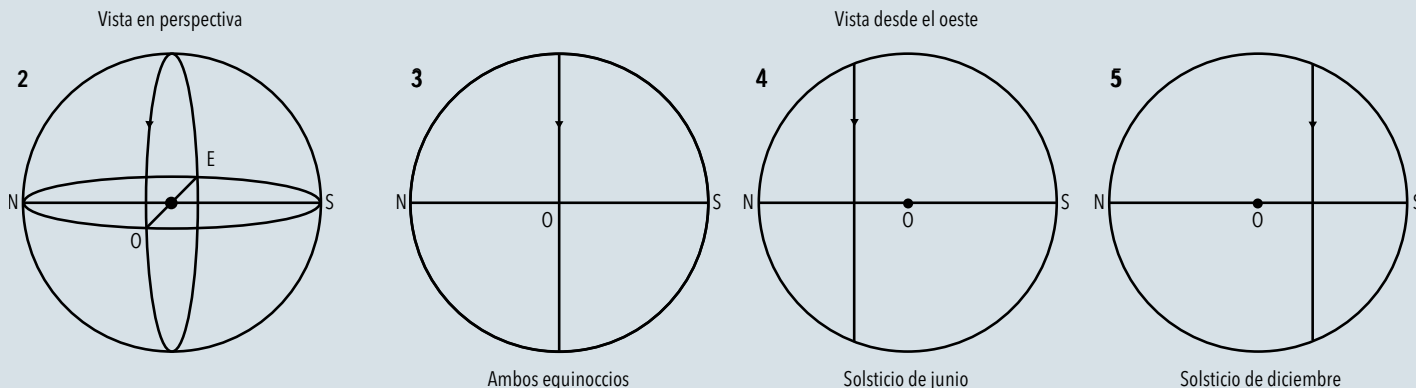


Figura 2. Representación en perspectiva de cómo un observador ubicado fuera de la esfera celeste -que considerara fija a la Tierra y móvil al Sol- concebiría la trayectoria diaria de este, causa de la alternancia de noche y día en nuestro planeta. La circunferencia representa la bóveda celeste; la elipse vertical, el plano de la trayectoria diaria del Sol (para nosotros, trayectoria aparente), y la elipse horizontal, el plano del horizonte para un habitante de regiones ecuatoriales, con los puntos cardinales indicados. En este caso particular, el plano del ecuador terrestre (y celeste) coincide con el de la trayectoria del Sol. El punto central, enormemente agrandado para que se note, es la Tierra. El croquis corresponde a cualquiera de los dos equinoccios.

Figura 3. Representación frontal de lo que muestra la figura 2 mirando desde el infinito en dirección oeste-este. Eso se vería en ambos equinoccios.

Figura 4. Igual representación que la figura 3 pero durante el solsticio de junio.

Figura 5. La misma representación durante el solsticio de diciembre.

res al eje de rotación terrestre. Y como el ecuador celeste -la proyección del círculo ecuatorial de la Tierra en la bóveda celeste- es ortogonal al eje de la Tierra (figura 1), el arco que describe el Sol en el cielo es siempre paralelo al ecuador celeste.

¿Qué ve una persona que está en el ecuador?

Supongamos que nos encontremos en el Sol, un 21 de marzo, mirando hacia la Tierra, la que se nos aparecerá como la representa la figura 1. Nuestra línea de visión será paralela al plano de la eclíptica, porque este es el que contiene la trayectoria recorrida por nuestro planeta en su traslación anual en torno al Sol. Imaginemos ahora qué verá ese día una persona ubicada sobre el ecuador, en la superficie de la Tierra. A medida que esta gira sobre su eje, advertirá que el Sol emerge perpendicularmente al horizonte exactamente por el este. Luego seguirá un camino circular por encima de su cabeza, pasará por el cenit, y se pondrá perpendicularmente al horizonte por el oeste. La figura 2 esquematiza esa situación en perspectiva: el círculo indica la bóveda celeste de ese observador; el pequeño círculo negro en el centro, la Tierra; la elipse horizontal marca el plano del horizonte de dicho observador; y la elipse ver-

tical, el plano de la trayectoria aparente del Sol para él. Puesto que el observador está en el ecuador, ambos planos son perpendiculares. La figura 3 indica cómo se vería lo descrito no en perspectiva sino frontalmente desde el oeste. Como los planos de la trayectoria solar y del horizonte se ven, por así decirlo, de canto, están representados por las dos líneas rectas (este croquis vale para ambos equinoccios).

Ahora imaginemos que pasaron tres meses, durante los cuales la Tierra completó un cuarto de su órbita, y que aún seguimos ubicados en el Sol mirando hacia aquella. En esa situación, si consideramos nuevamente la figura 1, nosotros (y el Sol) nos encontraremos a la derecha del dibujo y será el 21 de junio, el solsticio de verano para el hemisferio norte (y de invierno para el sur). En esa fecha, el hemisferio norte está inclinado hacia el Sol y el sur lo está en sentido contrario. El Sol pasa por el cenit para los observadores que se encuentran en el hemisferio norte en la latitud $23,5^\circ$. De hecho, ese día la distancia angular entre el Sol y el ecuador celeste (lo que denominamos *declinación* del Sol) será de exactamente $23,5^\circ$. Pero para nuestro observador en el ecuador (en la latitud 0°), la trayectoria del Sol se habrá desplazado hacia el norte, desde su salida hasta su puesta, y no pasará por el cenit a mediodía. Esta situación se representa en la vista frontal de la figura 4.

Seis meses después, luego de que la Tierra haya recorrido la otra mitad de su

trayectoria alrededor del Sol, será el 21 de diciembre, el otro solsticio (en el camino habrá pasado por el equinoccio del 21 de septiembre). En ese momento el observador del ecuador verá el Sol desplazado hacia el sur, como lo indica la figura

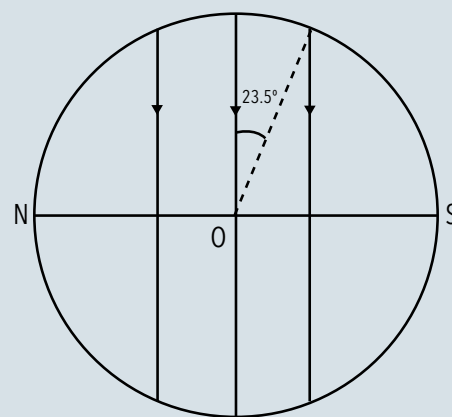


Figura 6. Este croquis superpone los tres anteriores. La línea punteada indica el ángulo del plano de la trayectoria de Sol con respecto al ecuador celeste, llamado *declinación*, medido en grados. La figura muestra las dos declinaciones extremas del Sol: $+23,5^\circ$, cuando está hacia el norte (línea vertical de la izquierda) y $-23,5^\circ$ cuando está hacia el sur (línea vertical de la derecha, con el ángulo dibujado en la figura). La declinación del Sol abarca así unos 47° , que recorre en aproximadamente seis meses, aunque no a velocidad constante.

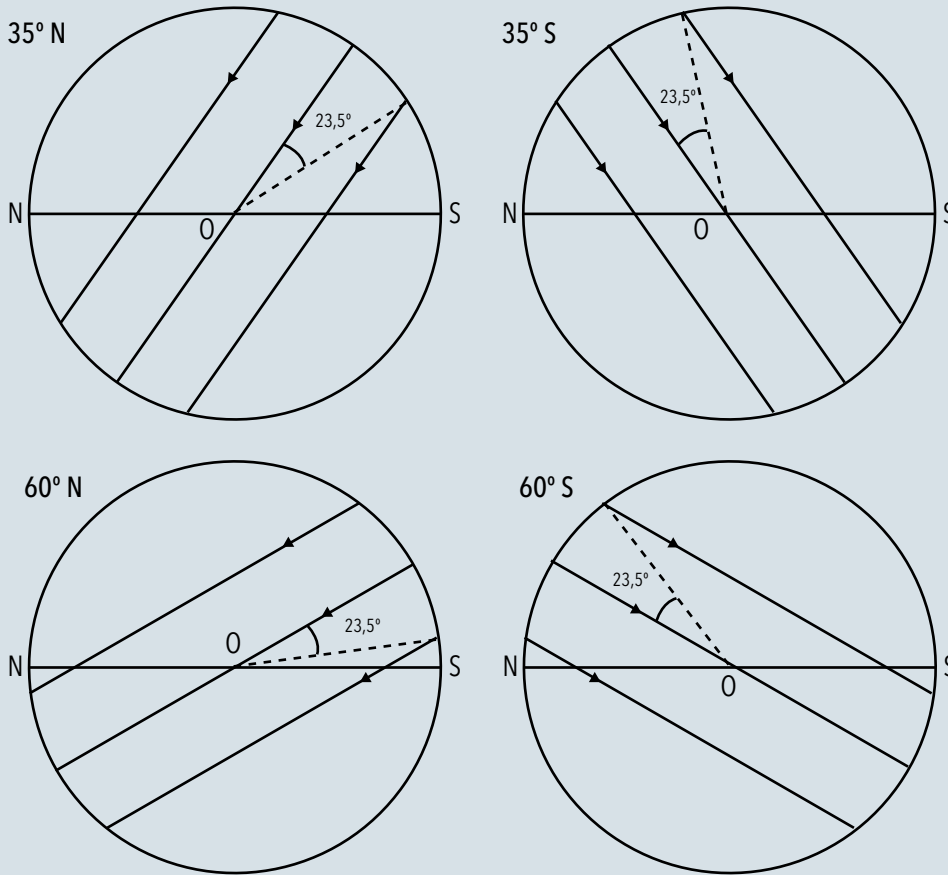


Figura 7. Trayectorias diurnas del Sol para observadores en cuatro latitudes diferentes, que podrían ser el sur de California, Buenos Aires, Estocolmo y el extremo de la península antártica. Como en los diagramas anteriores, de las tres líneas paralelas, la central corresponde a los equinoccios y las otras dos a cada solsticio.

5, también una vista frontal (y una imagen especular de la anterior). Las figuras 4 y 5 muestran los dos puntos de máximo alejamiento del Sol del ecuador, o su declinación máxima: $+23,5^\circ$ o $-23,5^\circ$ medidos del ecuador celeste. La figura 6, que reúne a las tres precedentes, sintetiza lo explicado. La trayectoria del Sol cada día del año aparecería como un segmento vertical entre los dos más alejados de esa figura.

¿Y si no está en el ecuador?

Ahora supongamos que nuestro observador se aleja del ecuador. A medida que lo hace, su latitud aumenta: por convención, ese alejamiento se expresa en valores positivos hacia el norte y negativos hacia el sur (o alternativamente, se reemplaza el signo por las letras N o S). Además, a medida que la distancia del ecuador aumenta, el ángulo entre el plano de la tra-

yectoria del Sol y el del horizonte de cada lugar va progresivamente disminuyendo: los 90° que tenía en el ecuador quedan reducidos a cero al llegar a cualquiera de los polos. Esto se ilustra en la figura 7, que muestra la trayectoria aparente del Sol en cuatro ubicaciones: las latitudes 35° y 60° al norte y al sur del ecuador, que podrían, por ejemplo, corresponder respectivamente al sur de California, Buenos Aires, Estocolmo y el extremo de la península antártica. Nótese que el ángulo de $23,5^\circ$, que corresponde a la máxima declinación del Sol, no varía. Obsérvese también que el ángulo de las trayectorias aparentes del Sol aumenta progresivamente con respecto a la vertical del sitio: 0° en el ecuador y 90° en cualquiera de los polos.

Si volvemos a la figura 6, para un observador en el ecuador, podremos advertir que durante los solsticios (los segmentos verticales extremos) tanto el lugar de la salida como el de la puesta del Sol están en un rumbo alejado $23,5^\circ$ de la dirección este-oeste. La figura 7 muestra que ese ángu-

lo se incrementa a medida que aumenta la latitud del observador. En Estocolmo, por ejemplo, los puntos de salida y de puesta del Sol se acercan más al punto cardinal norte (en el solsticio de junio) o al sur (en el solsticio de diciembre) que al este o al oeste. Por ello, si hubiese formulado mi pregunta inicial a un grupo de suecos, es probable que su respuesta hubiese tenido en cuenta esta situación.

Un instrumento simple para un cálculo complejo

En realidad, los diagramas anteriores no son exactos; para guardar completo rigor, nuestras explicaciones deberían haber repetido múltiples veces la palabra 'aproximadamente', porque, entre otras razones, los ángulos reales se encuentran sobre la esfera celeste y no en un plano (y la suma de los ángulos interiores de un triángulo dibujado en el cielo sobrepasa los 180°). Aunque se pueden hacer cómputos gráficos y analíticos que permiten calcular con precisión el sitio de salida y puesta del Sol en cada día del año (es decir, para cada posible declinación del astro), tienen su complejidad debido a que es necesario valerse de geometría y trigonometría esféricas.

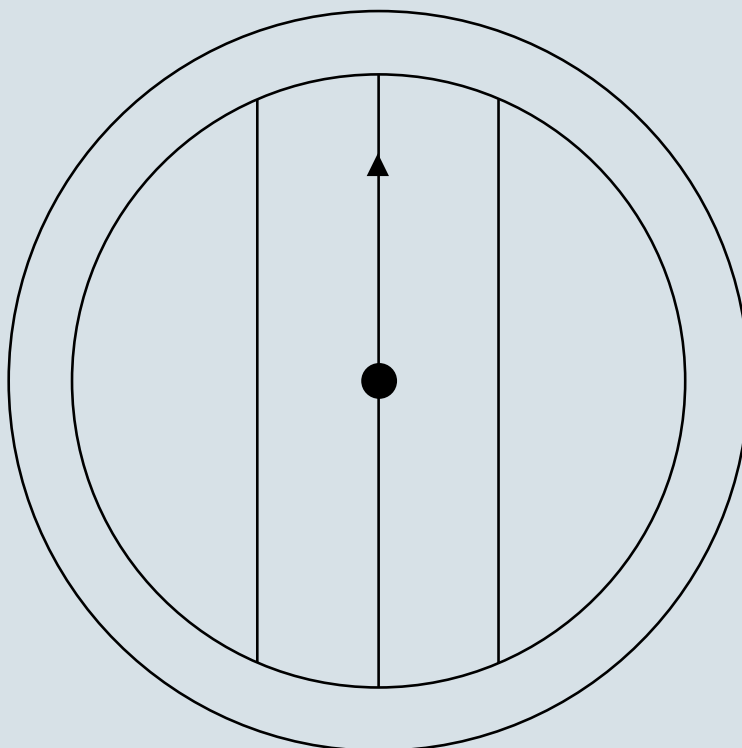
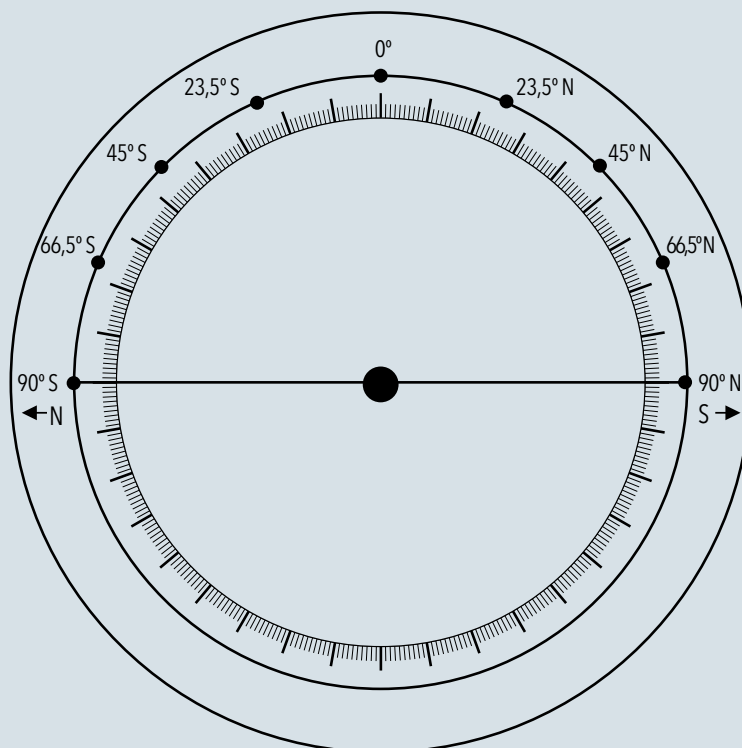
Podemos, sin embargo, presentar una herramienta simple que ayude a los estudiantes a comprender la desviación angular hacia el sur o el norte, con relación al rumbo este-oeste, de la salida y la puesta del Sol. En las figuras 8 y 9 presentamos dos diagramas para ser utilizados juntos. Se sugiere reproducir el primero en papel blanco y pegarlo sobre una base rígida; y reproducir el segundo en una lámina transparente para colocarlo centrado sobre el anterior. La flecha de este se utiliza para indicar la latitud del observador sobre el cuadrante numerado en grados de la figura 8. Esto permite elegir cualquier latitud que se desee. A la luz de las explicaciones de las figuras 1 a 7, la forma de usar esta herramienta debería resultar clara.

Con este dial de salida y puesta del sol se pueden analizar situaciones que suelen causar dolores de cabeza a los estudiantes y profesores de física y astronomía. Por ejemplo, un observador ubicado en uno de los trópicos –el de Cáncer, en latitud $23,5^\circ$ N, o el de Capricornio, en latitud $23,5^\circ$ S– verá que en el solsticio de verano

de su hemisferio el Sol alcanza el cénit a mediodía. Anualmente, sobre los trópicos hay un solo día en que eso sucede. En cambio, en latitudes inferiores a $23,5^\circ$, es decir, en la franja entre ambos trópicos que contiene en su centro al ecuador, eso acontece exactamente dos veces por año, una en primavera y otra vez en verano, mientras que los observadores en latitudes superiores a $23,5^\circ$, es decir, entre los trópicos y los polos, nunca ven al Sol en su cénit (esa es la situación que se ilustra en la figura 7).

Veamos ahora qué sucede sobre los círculos polares, en las latitudes $66,5^\circ$ N o S según el caso. Si empleamos nuestro instrumento, podemos fácilmente advertir que durante el respectivo solsticio de invierno tanto la salida como la puesta del Sol suceden en el mismo punto en el horizonte, es decir, en el punto cardinal sur o norte respectivamente. En regiones de latitud superior, entre el círculo y su polo, el Sol sencillamente no sale en invierno: es lo que se conoce como *noche polar*, mientras que en la región polar opuesta, que está en verano, el Sol no se pone y se produce el llamado *sol de medianoche*. Ambas situaciones quedan de manifiesto en nuestro dial, que indica, según el caso, que la trayectoria del Sol se cumple por completo por encima o por debajo del horizonte (figura 10).

A mayor latitud, es decir, cuanto más cerca del polo, mayor será la duración de la noche polar y, correspondientemente, más largo será el tiempo con sol de medianoche en las antípodas. En la situación extrema de los polos, con latitud 90° , la flecha de nuestro instrumento apuntará horizontalmente (figura 11) y durante seis meses el Sol no saldrá, mientras que durante los otros seis meses no se pondrá. Hay pues en los polos seis meses de luz diurna o seis meses de noche, aunque, debido a que el Sol no es un punto sino que se nos presenta como un disco de cierto tamaño, estos números no pueden considerarse exactos. Cuando el Sol se encuentra parcialmente por encima del horizonte, podríamos decir que es día, y debido a la refracción que produce la atmósfera terrestre, cuando está poco por debajo del horizonte, la noche polar no pasa de ser un crepúsculo.



Figuras 8 (arriba) y 9 (abajo). Instrumento pedagógico recomendado por el autor para trabajar en el aula sobre el tema de esta nota. Reproduce los diagramas de las ilustraciones precedentes. Se recomienda reproducir ambas figuras en tamaño no menor a 15×15 cm, la primera en papel blanco a ser pegado sobre un soporte rígido, y la segunda en celuloide transparente o material similar, para ser montada sobre la otra. Para usar el instrumento, apuntar la flecha de la figura 9 a la latitud del observador. Esa flecha está sobre la trayectoria que sigue el Sol durante los días de equinoccio. Las otras dos rectas marcan su trayectoria durante los solsticios: la de la izquierda siempre corresponde al solsticio de junio; la de la derecha, al de diciembre.

Comentarios finales

Con el sencillo instrumento presentado, el profesor podrá ayudar a los alumnos a

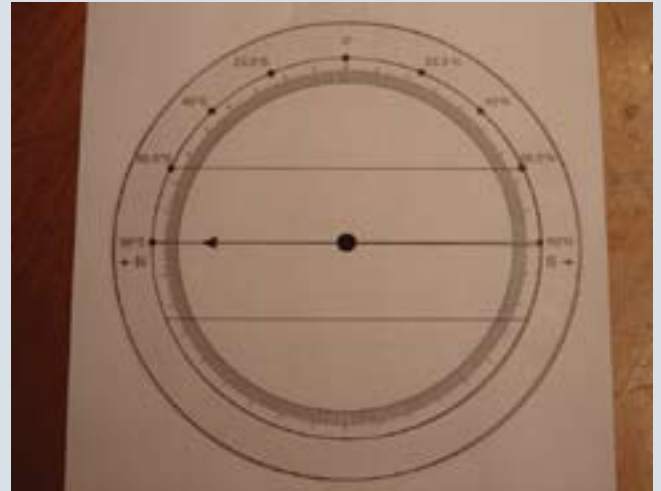
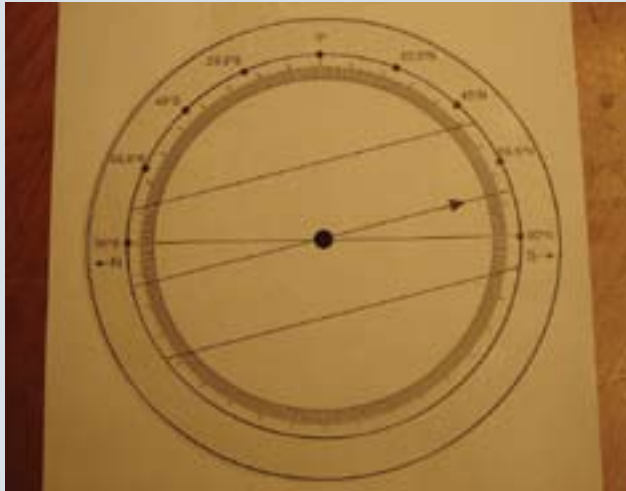


Figura 10. Ejemplo del uso del instrumento construido por el autor: el dial se reguló para una latitud entre el círculo polar ártico y el polo norte. Se puede advertir que en los equinoccios (recta del centro) el horizonte divide el trayecto del sol en dos partes iguales, de suerte que el día (segmento por encima del horizonte) es igual que la noche. En cambio, en el solsticio de verano (recta superior) el sol nunca desciende por debajo del horizonte y hay sol de medianoche, mientras que en el de invierno nunca está por encima de él y reina la noche polar.

Figura 11. Otro ejemplo, con el dial regulado para el polo sur. Apreciará el lector que durante todo el tiempo la trayectoria aparente del Sol es paralela al plano del horizonte, y que durante un semestre es siempre día y durante el otro siempre noche, aunque en términos reales ambas partes estén separadas durante muchos días por un crepúsculo lentamente cambiante.

entender por qué el Sol solo sale y se pone exactamente por el este y el oeste en contadas ocasiones en los diferentes lugares de la Tierra. También podrán apreciar en forma cualitativa a qué distancia del rumbo este-oeste sale o se pone el Sol en una latitud y una época del año determinadas.

El mismo instrumento, y en especial sus limitaciones, le permitirán promover la discusión sobre la relevancia de la geometría esférica para hacer cálculos precisos sobre distancias y ángulos en la bóveda celeste. Pues no debe olvidarse que con nuestro dial hemos proyectado sobre un plano lo que originalmente formaba parte de la bóveda esférica del cielo, y por ello las distancias, por ejemplo, entre el oeste y los puntos del horizonte

en donde se pone el Sol, no son lineales sino angulares: hacia los extremos -norte o sur- del instrumento, evidentemente, debe tenerse especial cuidado al medir pues las deformaciones son grandes. Esto, sin embargo, no es nada nuevo en la escuela: lo mismo le sucede a las regiones polares del globo terrestre cuando se las dibuja en un mapa plano para poder trabajar con mayor comodidad.

Por otro lado, vale la pena discutir con los alumnos cuánto influye en las complicaciones señaladas a lo largo de esta nota el valor de la oblicuidad de la eclíptica (esto es, el valor de la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto a la recta ortogonal al plano de la eclíptica). De lo discutido en la nota y, especialmente, de

mirar las figuras presentadas, surge que el valor real de la oblicuidad es muy relevante para el instrumento presentado aquí. ¿Qué sucedería si la oblicuidad variara con el tiempo? De hecho, es sabido que lo hace, pues su valor va disminuyendo muy lentamente con el correr de los milenios. ¿Podemos imaginar el caso en que la oblicuidad sea cero? ¿Cómo quedaría nuestro dial en ese caso? ¿Cómo sería la vida en un planeta cuyo eje de rotación fuese perpendicular al plano de su órbita alrededor de su estrella madre? Se puede pensar, con un poco de optimismo, que estas y otras preguntas llevarían al estudiante a embarcarse en otros razonamientos que desafíen su mente y, quizá, mejoren su actitud hacia la matemática y la ciencia en general. **CH**

LECTURAS SUGERIDAS

CAMINO N y ROS R, 1997, '¿Por dónde sale el Sol?', *Educación en Ciencias*, 1, 3: 11-17.

GANGUI A, 2011, 'Whither does the Sun rove?', *The Physics Teacher*, 49: 91-93.

Sitio web, <https://picasaweb.google.com/algangui/PorDondeSaleElSol>.



Alejandro Gangui

Doctor en astrofísica, Escuela Internacional de Estudios Avanzados (International School for Advanced Studies), Trieste.

Investigador independiente, Conicet.

Profesor, 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