

## Astronomía de posición

La humanidad ha observado el cielo desde tiempos remotos. Las culturas mayas, china, así como la inca hacían observaciones astronómicas, en particular para identificar las épocas más propicias para sembrar, cosechar, etc. Algunas culturas, como la griega y la árabe consideraban que las estrellas formaban figuras llamadas constelaciones y las nombraban según su mitología. También se han usado estrellas para orientarse en la navegación por lo que se les han asignado coordenadas.

Cuando tenemos la necesidad de encontrar un lugar en específico, sólo con su dirección nos podemos ayudar de un mapa. En ese caso estamos usando un sistema de coordenadas, en cualquier sistema de coordenadas es necesario tener referencias. Por ejemplo, en una ciudad una referencia muy importante es el lugar en el que se cruzan las calles principales, que a su vez denotan el centro de la ciudad. A continuación, se describen algunas referencias usadas en Astronomía y se dan algunas definiciones

### Coordenadas geográficas

El cielo no se ve igual desde cualquier lugar sobre la tierra. Desde un sitio podemos ver unas estrellas y desde otro podemos ver otras estrellas. Para entender las diferencias en la ubicación sobre la tierra es importante conocer los siguientes conceptos de coordenadas terrestres.

**Eje Polar:** es un eje imaginario alrededor del cual gira la Tierra en su movimiento de rotación, pasa por los polos de la Tierra.

**Ecuador terrestre:** es la circunferencia imaginaria que divide a la superficie de la Tierra en dos partes iguales, es perpendicular al eje de rotación de esta. (Figura 1)

**Plano Ecuatorial:** es un plano imaginario sobre el cual está el Ecuador terrestre.

**Paralelo:** es una circunferencia imaginaria sobre la superficie de la Tierra, va en dirección Este-Oeste y es paralela al Ecuador terrestre (Figura 1).

**Meridiano de un lugar dado:** es la semicircunferencia que va de un polo de la Tierra al otro. (líneas a trazos en la Figura 1.1). Podemos imaginarlas como las rebanadas de un melón.

**Meridiano de Greenwich:** es el meridiano que pasa por el observatorio de Greenwich en Inglaterra. A partir de él se mide la longitud terrestre, es decir, la longitud del meridiano de Greenwich es de cero grados ( $0^\circ$ ).

**Longitud geográfica de un lugar dado:** es el ángulo medido en el plano del ecuador, entre el meridiano de dicho lugar y el meridiano de Greenwich. La longitud se mide hacia el Oeste del meridiano de Greenwich para sitios que estén a longitudes de menos de  $180^\circ$  (Figuras 2) y al Este para sitios que estén a valores menores de  $180^\circ$  hacia el Este.

**Latitud geográfica de un lugar dado:** es el ángulo medido a lo largo del meridiano de dicho lugar entre el plano del Ecuador y el lugar dado (Figura 2). Usualmente se denota con la letra  $\phi$ .

**Culminación de una estrella en un lugar dado:** es el momento en que dicha estrella pasa por el meridiano de dicho lugar. Una estrella alcanza su mayor altura durante su culminación. Hay que tener en cuenta que la culminación de una estrella depende de la longitud geográfica del lugar.

La **Culminación superior** corresponde al momento en que la estrella pasa por enfrente del meridiano y **La Culminación inferior** al momento en el que pasa por la parte opuesta.

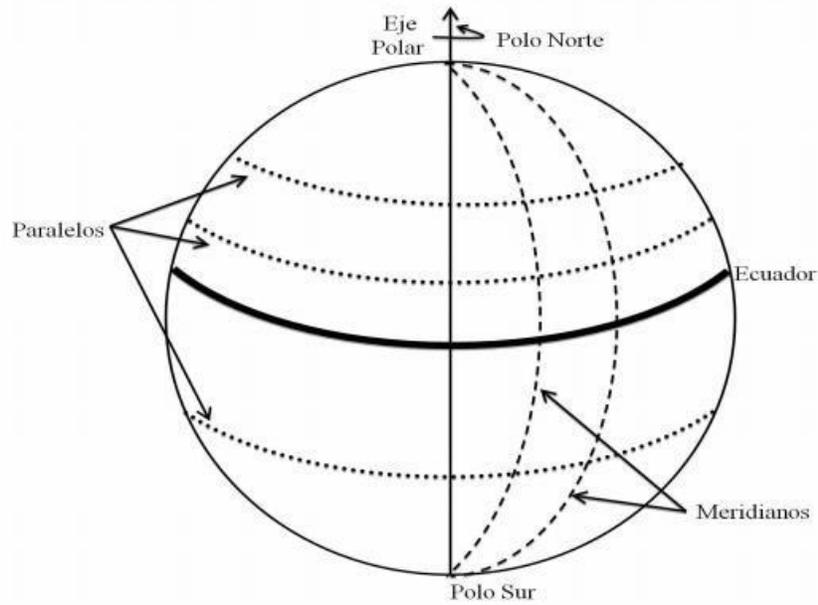


Figura 1: Se muestran algunas líneas imaginarias sobre la superficie de la tierra.

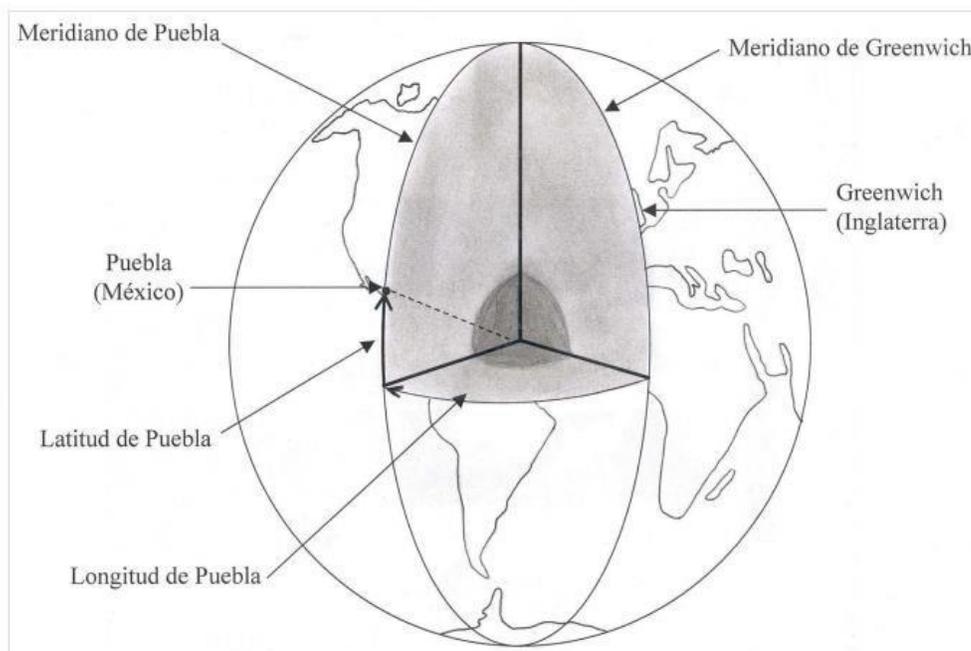


Figura 2: Se muestra cómo se miden la longitud terrestre y la latitud geográfica usando el ejemplo de la ciudad de Puebla, México.

## Definiciones básicas de Astronomía Esférica

Desde la Tierra las estrellas parecen estar sobre una esfera. Por esta razón, en Astronomía se usa el concepto de esfera Celeste y las posiciones de las estrellas se estudian como si estuvieran en dicha esfera y la Tierra estuviera en su centro. Las siguientes definiciones ayudan a tener referencias en la esfera Celeste.

**Cenit:** es el punto de la esfera Celeste que esta sobre el observador.

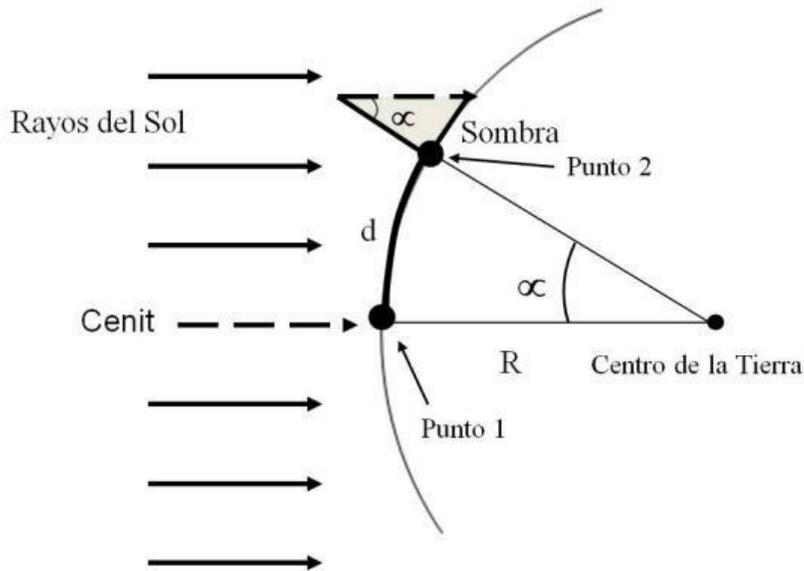


Figura 3 Representación de los rayos solares incidiendo sobre un objeto vertical. Se indica el triángulo que forman un rayo de luz que pasa sobre el extremo superior del objeto, el objeto y su sombra, a su vez se representa el triángulo formado por dos sitios, uno donde está el objeto que produce sombra y el otro ese mismo día no se produce sombra durante la culminación del sol.

**Nadir:** Es el punto de la esfera celeste que está por debajo del observador.

**Círculo mayor:** es el círculo que resulta de la intersección de un plano con una esfera y que la divide en dos partes iguales (semiesferas). En el caso de la esfera Celeste un círculo mayor pasa por la Tierra.

**Círculo menor:** es el círculo que resulta de la intersección de un plano con una esfera y que la divide en partes diferentes.

**Polo Norte Celeste y Polo Sur Celeste:** son los puntos en los que el Eje Polar interseca a la esfera Celeste.

**Ecuador Celeste:** es la circunferencia en la esfera Celeste sobre el Plano Ecuatorial. El Ecuador Celeste lo podemos visualizar como la circunferencia que resulta de proyectar el Ecuador terrestre en la esfera Celeste.

**Paralelo diario:** es cualquier circunferencia de la esfera Celeste que es paralela al Ecuador Celeste. El movimiento diario de una estrella ocurre a lo largo de un "paralelo diario".

**Círculo horario de una estrella:** es el círculo de la esfera Celeste que pasa a través de los polos y de dicha estrella.

### Las estrellas vistas desde diferentes latitudes terrestres

Desde el hemisferio Norte la estrella polar la podemos ver, sin embargo, desde el hemisferio Sur no se ve. Por lo que es claro que en un lugar se ven estrellas que no pueden verse desde otro. A continuación, vamos a ver algunas definiciones que nos van a ayudar a entender la causa de esto.

**Vertical:** es la línea recta imaginaria que va del Zenit al Nadir.

**Plano horizontal:** es el plano imaginario perpendicular a la vertical de un observador dado. El plano horizontal divide a la Esfera Celeste en 2 semiesferas. Una de ellas está sobre el observador, es decir es la semiesfera observable, la otra semiesfera no la ve el observador.

**Horizonte de un observador dado:** es la intersección del plano horizontal de dicho observador y la esfera Celeste.

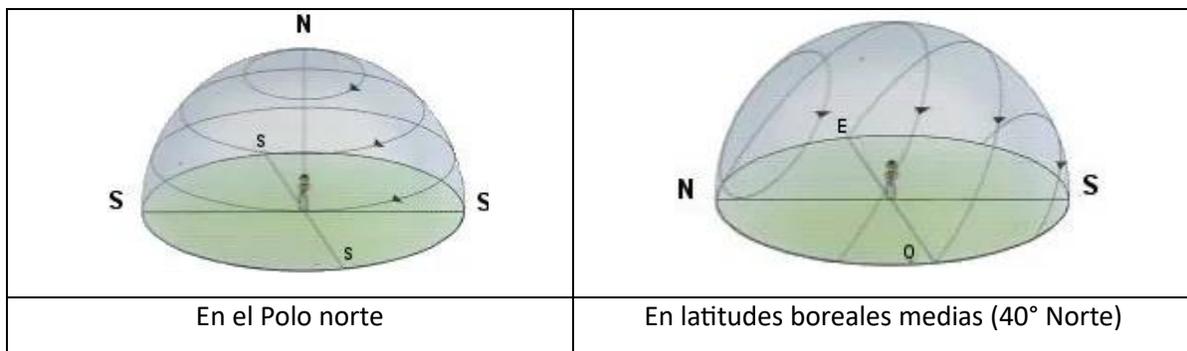
**Este y Oeste:** son los puntos en los que el Ecuador Celeste cruza el horizonte de un observador. Se usarán las letras E y W para denotarlos cuando convenga.

**Meridiano Celeste de un lugar:** es la circunferencia en la esfera Celeste que pasa por los polos y el cenit de dicho lugar.

### Variación debida a la rotación de la Tierra sobre su eje

Sabemos que una persona en Costa Rica no ve las mismas estrellas que una en Rusia o Ecuador, esto por las latitudes de estos lugares. Ahora veremos un concepto que nos ayudara a entender la razón de que las estrellas parezcan moverse en el cielo.

**Movimiento diurno de las estrellas:** es el movimiento aparente de las estrellas en la esfera Celeste debido a la rotación de la Tierra. En dicho movimiento las estrellas giran en torno al Eje Polar. En las Figura 4 se muestran las trayectorias de estrellas debido al movimiento diurno como se observan en diferentes latitudes sobre la Tierra.



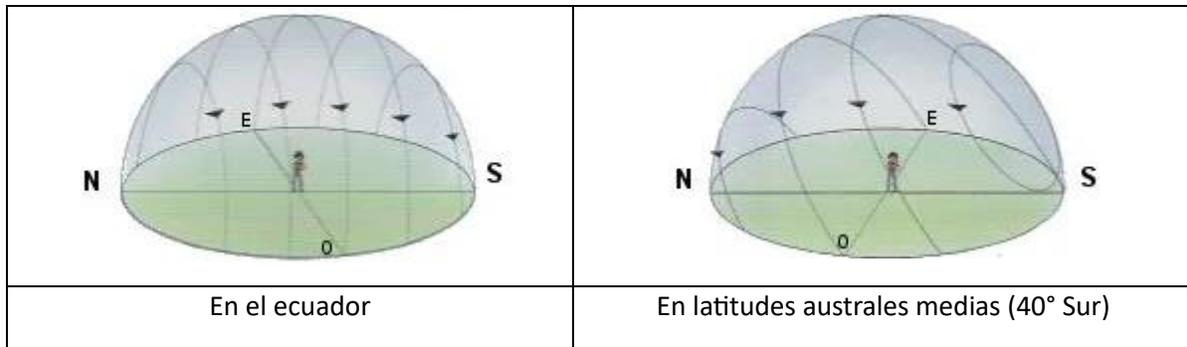


Figura 4. Movimiento de las estrellas visto desde diferentes latitudes boreales (hemisferio norte) y australes (hemisferio sur)



Figura 5. Estrellas Girando alrededor del eje Polar. Los telescopios con montura ecuatorial como el mostrado en la figura, se alinean usando la estrella polar como referencia.

**Precesión:** es el movimiento del eje de rotación de un cuerpo. Como resultado de este movimiento el eje no apunta siempre hacia el mismo lugar. Por ejemplo, cuando el eje de un trompo se mantiene en la misma dirección mientras el trompo gira se dice que el trompo se durmió, sin embargo, si el trompo recibe un leve empujón entonces su eje empieza a girar, ya no está durmiendo como cuando no precesaba, sino que ahora está “bailando”.

Los planetas también presentan movimiento de precesión. En el caso de la Tierra, dicho movimiento se debe a que la fuerza de atracción gravitacional del Sol no es uniforme, además la Tierra no es esférica, la zona del ecuador es más extendida que la zona de los polos, además, el eje de rotación de la Tierra está inclinado respecto al plano de la eclíptica. Por lo que la atracción

gravitacional del Sol “jala” la zona del Ecuador, de forma similar al empujón que le damos al trompo para que baile.

El polo de la Tierra actualmente apunta hacia la estrella polar Figura 5. Sin embargo, debido al movimiento de precesión la dirección va cambiando ligeramente año con año. El tiempo se tarda en dar una vuelta es aproximadamente de 26,000 años. La precesión del eje terrestre conduce a variaciones de la ascensión recta y la declinación de las estrellas.

**Nutación:** es un movimiento del eje de la Tierra que, se superpone al movimiento de precesión. Debido a este movimiento, el eje de la Tierra se mueve en oscilaciones como. Este movimiento se debe a que la órbita de la Luna está inclinada respecto a la eclíptica por lo que el plano de la órbita de la Luna es “jalado” por la fuerza de atracción del Sol produciendo un movimiento de precesión del plano de la órbita de la Luna. El periodo de precesión de la órbita de la Luna es de 18.6 años y produce perturbaciones en el eje de la tierra con el mismo periodo.

### Sistema horizontal de coordenadas Celestes

Se basa en las posiciones de las estrellas que ve un observador dependiendo del lugar en el que está, las referencias principales son el plano horizontal y el Norte sobre este.

**Círculo vertical de una estrella:** círculo mayor de la esfera Celeste que pasa por dicha estrella y el cenit de un observador dado.

**Altura de una estrella ( $\alpha$ ):** ángulo medido sobre el círculo vertical desde el plano horizontal hasta la estrella. Esta entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y es diferente para dos observadores a distintas latitudes.

**Acimut de una estrella:** ángulo sobre el plano horizontal medido en sentido horario, puede estar entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Se define como:

- a. Ángulo del Norte hasta donde se cruza el círculo vertical de una estrella y el horizonte. Acimut ( $A$ ).
- b. También se usa el acimut con referencia al Sur.

$A_S$	$A_N$	Relación entre $A_N$ y $A_S$
$0^\circ$ a $180^\circ$	$180^\circ$ a $360^\circ$	$A_N = A_S + 180^\circ$
$180^\circ$ a $360^\circ$	$0^\circ$ a $180^\circ$	$A_N = A_S - 180^\circ$

**Distancia cenital:** ángulo entre el Cenit y la estrella.

## Referencias en la órbita de la Tierra

La Tierra se mueve alrededor del Sol. En cada posición de la Tierra sobre su órbita solo podemos ver las estrellas que están en el lado contrario del Sol. Por eso, en una época del año vemos unas estrellas que no vemos en otra época.

**Plano de eclíptica:** plano donde la Tierra describe la traslación alrededor del Sol. El Plano Ecuatorial esta inclinado  $23,5^\circ$  respecto al plano de la eclíptica.

**Eclíptica:** circunferencia en la esfera Celeste que traza el Sol a lo largo de un año. Cruza el Ecuador Celeste en dos ocasiones o puntos: equinoccio de primavera ( $\gamma$ ) y equinoccio de otoño.

**Equinoccio:** momento en el que la trayectoria del Sol cruza el Ecuador Celeste, ocurre dos veces al año, alrededor del 21 de marzo (de primavera ( $\gamma$ )) y del 22 de septiembre (de otoño). En estos días el día y la noche duran lo mismo.

**Punto vernal:** es el punto en la esfera Celeste en el que el Sol cruza el Ecuador Celeste cuando pasa del hemisferio Sur al Norte.

**Solsticio:** es el momento en el que el Sol está en su posición extrema al Sur (solsticio de invierno: 21 dic, más horas con luz del Sol) o al Norte (solsticio de verano: 21 de junio, menos horas con luz del Sol).

## Sistemas de coordenadas ecuatoriales

Se basa en la posición de la Tierra respecto de las estrellas, no dependen de la posición del observador sobre la Tierra. Las referencias son el Plano Ecuatorial y el Punto Vernal.

Coordenadas ecuatoriales absolutas: Declinación y Ascensión Recta

**Declinación de una estrella( $\delta$ ):** ángulo medido sobre el círculo horario de la estrella, que va desde el Ecuador Celeste hasta la estrella. Toma valores negativos (de  $-90^\circ$  a  $0^\circ$ ) para estrellas al Sur del Ecuador Celeste y valores positivos (de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) para estrellas al Norte del Ecuador Celeste. La declinación de un punto que esta sobre el Ecuador Celeste es cero, la del punto que esta sobre el Polo Norte es  $90^\circ$  y la del que esta sobre el Polo Sur es  $-90^\circ$ . Por la inclinación del eje terrestre la declinación del Sol varía de  $+23.5^\circ$  a  $-23.5^\circ$  a lo largo del año.

**Ascensión recta de una Estrella ( $\alpha$ ):** ángulo que se forma entre el Punto Vernal y la intersección del círculo horario de dicha estrella con el Ecuador Celeste, se mide hacia el Este sobre el Ecuador Celeste y puede tomar valores entre 0 y 24 horas. La ascensión recta de estrellas no cambia con la rotación de la esfera Celeste, pero varia a lo largo del año entre 0 y 24 horas por su movimiento en la esfera Celeste.

Coordenadas ecuatoriales locales: Declinación y Angulo Horario

Angulo horario de una estrella: ángulo sobre el Ecuador Celeste, que va del punto de intersección del meridiano celeste del observador y el ecuador hasta el círculo horario que pasa por dicha estrella. Se mide de Este a Oeste y puede tomar valores entre 0 y 24 horas, se usa principalmente para la determinación del tiempo.

## Relación entre $\alpha$ , $s$ y $h$ .

Para conocer la hora sideral de un lugar.

$$s = h + \alpha$$

## Transformación de coordenadas horizontales a ecuatoriales.

Observamos una estrella desde un lugar cuya latitud es  $\phi$  y que para un momento dado. Las coordenadas horizontales de dicha estrella son acimut ( $A$ ) y altura ( $a$ ), con el acimut referido al Sur. A partir de los valores anteriores podemos conocer el ángulo horario  $h$  y la declinación de la estrella usando las siguientes ecuaciones:

$$\text{sen } h \cos \delta = \text{sen } A \cos a$$

$$\cos h \cos \delta = \cos A \cos a \text{ sen } \phi + \text{sen } a \cos \phi .$$

$$\text{sen } \delta = - \cos A \cos a \cos \phi + \text{sen } a \text{ sen } \phi .$$

## Transformación de coordenadas ecuatoriales a horizontales

Una estrella tiene coordenadas ecuatoriales  $\alpha$  y  $\delta$ . También vamos a suponer que esa estrella en el momento que la observamos está a un ángulo horario  $h$  desde el lugar donde estamos, y que dicho lugar está a una latitud geográfica  $\phi$ . Entonces, las coordenadas horizontales, acimut ( $A$ ) y altura ( $a$ ), con el acimut referido al Sur, se pueden calcular a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{sen } A \cos a = \text{sen } h \cos \delta$$

$$\cos A \cos a = \cos h \cos \delta \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta \cos \phi$$

$$\text{sen } a = \cos h \cos \delta \cos \phi + \text{sen } \delta \text{ sen } \phi$$

## Hora solar y hora sideral

La hora solar se mide tomando como referencia al Sol. El momento en el que el Sol pasa por el meridiano de un lugar son las 12:00 horas en tiempo solar. Si en dicho momento empezamos a medir el tiempo solar, entonces, cómo sería nuestra referencia, lo vamos a considerar el tiempo inicial cero.

La hora sideral de un lugar dado se mide tomando como referencia el Punto Vernal. La hora sideral es el ángulo horario del Punto Vernal desde dicho lugar. Por lo tanto, también ocurre que en el momento en el que el Punto Vernal pasa por el meridiano del lugar son las 0:00 horas en tiempo sideral para dicho lugar.

## Sombras de objetos a diferentes latitudes

En una situación donde el Sol está iluminando dos lugares distintos en la Tierra. Si esos lugares están a diferentes latitudes geográficas y en un mismo meridiano, entonces tenemos una situación como la representada en la Figura 3. Suponiendo que en uno de los lugares no se produce sombra durante su culminación (porque el Sol está en su cenit) y en el otro lugar si se produce sombra.

La extensión de la sombra depende de la ubicación de dicho lugar sobre la Tierra y también depende del radio de la Tierra. Si el sitio está cerca del lugar en el que el Sol está en el cenit entonces la sombra es pequeña. A medida que nos alejamos de dicho lugar la longitud de la sombra aumenta. Esto lo notó Eratóstenes y midiendo la distancia entre los dos lugares pudo medir el radio terrestre.

## Ejercicios con solución

### Medición del radio terrestre por el método de Eratóstenes

Eratóstenes, explicó en un escenario en el que la Tierra es redonda y el Sol está muy lejos por lo que los rayos solares llegan paralelos entre sí. El obelisco y su sombra son los catetos de un triángulo (Figura 3). Al medir el ángulo del vértice superior de dicho triángulo en la Figura 3 encontró que era de  $7.5^\circ$ .

Eratóstenes sabía que Alejandría se encontraba casi en el mismo meridiano que Siena y conocía la distancia ( $d$ ) entre estas ciudades (aproximadamente  $d = 800$  km). Con los datos anteriores calcula el radio terrestre.

### Respuesta

En la Figura 3 podemos ver claramente que uno de los lados es la distancia entre los dos sitios y que el ángulo  $\alpha$  es opuesto a este lado. Para ese caso tenemos que hay una relación entre la fracción de la circunferencia y el ángulo:

$$\frac{\alpha^\circ}{360^\circ} = \frac{d}{C}$$

Donde  $C$  es la circunferencia, entonces,

$$C = d \frac{360^\circ}{\alpha^\circ}$$

Sustituyendo valores resulta que

$$C = 800 \text{ km} \frac{360^\circ}{7.5^\circ}$$
$$C = 38400 \text{ km}$$

Y como la circunferencia se relaciona al radio por

$$C = 2\pi R$$

Entonces el radio es

$$R = \frac{C}{2\pi}$$
$$R = 6112 \text{ km}$$

Este valor del radio terrestre se aproxima mucho al valor que se considera correcto en la actualidad. Una vez que conoces el radio de la Tierra puedes calcular la circunferencia de la Tierra. También puedes calcular la superficie de la Tierra.

### Estrellas de día y de noche

A continuación, tenemos una lista de estrellas y su ascensión recta.

**ESTRELLA    ASCENSIÓN RECTA**

<b>1</b>	1°
<b>2</b>	21°
<b>3</b>	11°
<b>4</b>	16°
<b>5</b>	5°

**Cuando la ascensión recta del Sol es:  $\alpha = 6^\circ$**

¿Cuáles de las estrellas listadas aparecen durante el día?

¿Cuáles aparecen durante la noche?

Si el Sol estuviera en  $\alpha = 18^\circ$  ¿qué estrellas se verían de día?

Para el mismo caso de  $\alpha = 18^\circ$  ¿qué estrellas se verán de noche?

**Respuesta**

Si el Sol está en  $\alpha = 6^\circ$  la zona de la esfera Celeste que se ve durante el día es de

$6^\circ - 6^\circ$  a  $6^\circ + 6^\circ$  que es el intervalo de  $0^\circ$  a  $12^\circ$ . Las estrellas en ese rango de ascensiones rectas están sobre un observador en la Tierra pero debido a que el Sol ilumina la atmósfera terrestre esta no permite ver a dichas estrellas. Las que se ven de día son 1, 3 y 5.

Las estrellas que se ven de noche son 2 y 4.

Para cuando el Sol está en  $\alpha = 18^\circ$ , el rango de Ascensión recta que se ve de día es

de  $18^\circ - 6^\circ$  a  $18^\circ + 6^\circ$ , que es de  $12^\circ$  a  $24^\circ$ . Entonces de día se ven las estrellas 2 y 4.

De noche se verían las estrellas 1, 3 y 5.

### **Altura del polo Norte Celeste**

Si una persona está en un lugar a latitud  $l = 20^\circ$

- a) ¿Cuál es la altura del Polo Norte para dicho observador?
- b) ¿Cuál es el acimut del Polo Norte para este observador?
- c) ¿Cambian la altura y el acimut del polo celeste durante la noche para dicho observador?
- d) ¿Cambian la altura y el acimut a lo largo del año?

### **Respuesta**

La altura del polo Norte Celeste es de  $20^\circ$ .

El acimut es de  $0^\circ$ .

No, la altura y el acimut del polo Norte Celeste no cambian durante la noche.

No, la altura y el acimut del polo Norte Celeste no cambian a lo largo del año.

## Ejercicios propuestos

### Superficie terrestre

Se estima que  $\frac{3}{5}$  de la superficie terrestre están cubiertas por agua. Calcula y escribe, en notación científica, la superficie de la Tierra (en kilómetros cuadrados) que está cubierta por agua.

### Duración de la noche calculada a partir de la hora de salida del Sol

Supongamos que estamos en un sitio de la Tierra en el cual las noches y los días duran varias horas (es decir, no estamos en un sitio en donde el periodo de oscuridad puede ser mayor a un día). El mediodía se puede considerar como el momento intermedio entre la salida y la puesta de Sol. Si en un día dado en Greenwich, Inglaterra, el Sol salió a las 8:30 A.M. ¿Cuál es la duración de la noche?

### Ascensión recta del Sol y culminación de otras estrellas

El 21 de diciembre de 2009 la ascensión recta del Sol fue

$$\alpha = 17^{\text{h}}57^{\text{m}}49.0^{\text{s}}$$

a) Si la ascensión recta de la estrella Vega fue

$$\alpha = 18^{\circ}37'15.6'' \text{ ¿En qué lado del Sol estaba Vega, en el Este o en el Oeste?}$$

b) Si la ascensión recta de Sirio fue

$$\alpha = 6^{\text{h}}45^{\text{m}}34.0^{\text{s}}$$

¿Cuántas horas después del Sol estaba Sirio en culminación?

### Estrellas en culminación en el día y estrellas en culminación en la noche

La ascensión recta de la estrella 1 es  $14^{\text{h}}$  y la de la estrella 2 es  $6^{\text{h}}$

Si la estrella 1 está en culminación en un sitio ¿en qué zona del cielo, está la estrella 2, al Este o al Oeste?

En esa época ¿la estrella 2 está en culminación durante el día o la noche?