



ASTRONOMÍA PARA INGENIEROS INQUIETOS

EL SOL NOS DA LUZ, Y NOS GUÍA

Este documento es de uso único e intransferible para el alumno matriculado en el curso. Cualquier reproducción física o digital del documento sin permiso de los autores vulnera los derechos de propiedad intelectual de los mismos.

INDICE

INDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. EL CALENDARIO	5
2.1 Ajustes en el calendario. Ajuste juliano	7
2.2 Ajustes en el calendario. Ajuste Gregoriano.....	8
3. LA ECLIPTICA	19
4. DECLINACION, ANGULO HORARIO, ALTURA Y AZIMUT, MERIDIANOS Y PARALELOS.....	21
4.1 La esfera armilar.....	32
5. COMO CONOCER NUESTRAS COORDENADAS. LATITUD Y LONGITUD. INTRODUCCION A LA NAVEGACION ASTRONÓMICA	49

1. INTRODUCCIÓN

Mientras el hombre fue cazador-recolector su estrategia era básicamente seguir a las grandes manadas en sus continuas migraciones. Pero una vez se hizo agricultor, debió comenzar a aprender a entender los ciclos que se producían a lo largo del año. Sembrar tarde o sembrar demasiado pronto podía provocar la ruina de toda la cosecha y el hambre. Por este motivo la construcción de un calendario que encajara con los ciclos del sol fue absolutamente necesario. Hoy en día damos por obvio cuánto dura el año y cuando comienza exactamente. Pero si nos paramos a pensarlo, no es tan evidente.

2. EL CALENDARIO

PENSAR:

¿Por qué la semana tiene siete días?

Durante mucho tiempo fueron solo siete los astros móviles que se conocían en el cielo; Luna, Marte, Mercurio, Júpiter, Venus, Saturno y el Sol. Tengamos en cuenta que Urano, Neptuno y Plutón no se ven a simple vista y no se conocían.

Los antiguos babilonios dedicaron un día a cada una de estas divinidades. La mayoría de los estudiosos coinciden en que este es el motivo por el que la semana tiene 7 días¹.

Los romanos (en época de Constantino el Grande) copiaron la semana mesopotámica (hasta entonces no existía el concepto de semana en Roma), y nombraron los días de la semana con los nombres de los 7 astros del sistema solar, todos ellos nombres de dioses romanos: Lunes (luna), Martes (Marte), Miércoles (Mercurio), Jueves (Júpiter), Viernes (Venus), Saturni (Saturno) y Solis (sol).

Dios descansó al séptimo día según los judíos y según todas las religiones basadas en la biblia. Shabat significa descanso en hebreo. Por eso el séptimo día judío era el Shabat (sábado).

En castellano, solo el sábado y el domingo se cambiaron respecto al nombre original dedicado a los astros. El Domingo para celebrar el día de la resurrección del Dominus (Señor), que pasó a ser el último día de la semana (antes el primero).

Los nombres de los días de la semana en inglés tienen también nombres de la mitología germana, o de los astros: "Moonday" (Lunes-Luna), Tuesday (Día de Tuy, el Dios de la Guerra, como Marte para los romanos), Thursday (día de Thor, el Dios principal, como Júpiter para los romanos), Saturday, Sunday, etc...

¹ Siete son también los días que pasan entre cada fase de la luna; luna nueva-cuarto creciente-luna llena-cuarto menguante

Siete días (7,3 días exactamente) son también el número de días que transcurren entre cada ciclo de la luna (luna nueva - luna creciente - luna llena - luna decreciente) y las culturas semitas siempre se guiaron por el ciclo lunar.

De manera que un mes lunar tiene $4 \times 7,29 = 29,5$ días. Y 12 meses lunares formaban un año del calendario lunar, que tenía 355 días.

Sin embargo, los nombres actuales de los meses provienen del calendario romano. Hasta la guerra de los romanos con los celtíberos de Iberia (153 a.d.C.) el año romano empezaba por Martius (marzo), dedicado a Marte, y terminaba por Septiembre el séptimo, Octubre el octavo, Noviembre el noveno, Diciembre el décimo. Los últimos dos meses fueron llamados Enero (Januairo, dedicado al Dios Jano) y Febrero (dedicado a las fiestas Februa, dedicadas a las lupercales), que hasta entonces eran meses lunares sin nombre porque no se realizaban actividades sociales, militares ni económicas de importancia. El mes de Abril toma su nombre del momento en que se abrían las flores, y el mes de Mayo proviene de la ninfa Maya. El mes de Junio fue dedicado al Dios Juno. Y por último los meses Julio y Agosto los cambiaron de nombre Julio Cesar y Octavio Augusto respectivamente.

En efecto, hasta el 153 a.C., el inicio del año se producía en los idus de Marzo, fecha en que los cónsules eran nombrados anualmente por el senado. De hecho cada año se asociaba a los nombres de los cónsules.

Pero la guerra con los celtíberos de Hispania marcaría la fecha del inicio del año para toda la posteridad en casi todo el globo. Al estallar la segunda guerra celtíbera y declarada la guerra a la ciudad de Segeda, el General Nobilior pidió al Senado adelantar la fecha de los nombramientos a fin de poder adelantar el traslado de las tropas y preparar la campaña militar para la primavera, una vez pasado el crudo invierno del interior de Hispania. Si bien el pueblo de Roma siguió celebrando los idus de marzo, se trasladó oficialmente el comienzo del año y la toma de posesión de los cónsules a las calendas de enero (la primera luna nueva del mes).

PENSAR:

¿Cómo se ajustó el calendario de 355 días al año real de 365,25 días?

Los romanos incluían un mes adicional cada tres años. Este mes adicional se llamaba Mercedonius. De manera que 3 años romanos tenían 1094,5 días y tres años trópicos reales tienen 1095,75 días. Es decir lo habrían tenido bastante cuadrado, si no fuera porque en realidad el mes Mercedonius se ponía o se quitaba de manera un poco anárquica en función de intereses económicos, políticos, etc.... (El mes Mercedonius retrasaba 30 días el día de las elecciones de las primeras calendas de Marzo).

Al final estos desajustes hicieron que en Abril y Mayo (meses dedicados a la primavera) estaban en realidad en pleno invierno.

2.1 Ajustes en el calendario. Ajuste juliano

PENSAR:

Eres el astrónomo asesor de Julio César y te encuentras con el problema de que hay continuos desfases entre el año del calendario y el año real. Tu colaborador Sosígenes de Alejandría ha calculado que el **año trópico** (año entre cada solsticio de invierno) dura 365 días, 5 horas, 48 minutos y 45 segundos (365,242).

Sosígenes propuso fabricar un calendario de 365 días y añadir un día cada cuatro años. Fue una buena idea porque añadir un día era mucho menos traumático y menos radical que añadir un mes, y esto facilitó que se cumpliera la norma de manera puntual desde entonces. Con este calendario juliano, la media del año es de 365,25 días (muy similar al año trópico real).

La expresión “año bisiesto” deriva del latín “*bis sextus dies ante calendas martii*” que significa “*repítase el sexto día antes del primer día del mes de marzo*”.

Pero ojo, esto producirá un desfase de 0,008 días por año, es decir, 11 minutos y 15 segundos cada año respecto al año trópico. ¡Los solsticios seguirán retrasándose! Supone un 1 día oficial extra cada 128 años. Es decir los solsticios se irían adelantando perceptiblemente.

PRACTICA:

Con la APP SOLAR WALK comprueba que los años 41 a.d.C, 37 a.d.C, 1 a.d.C, 4 d.C, 8 d.C., etc.... son bisiestos.

2.2 Ajustes en el calendario. Ajuste Gregoriano

PENSAR:

Eres el astrónomo de la Universidad de Salamanca, asesor del papa Gregorio XIII en 1582. Estás preocupado porque existe un desfase evidente entre las fechas que tradicionalmente correspondían al solsticio de invierno según Constantino (21 de Diciembre) y la fecha real del solsticio de invierno que se da ahora el 11 de Diciembre. Qué reforma debes proponer al papa Gregorio

Con el ánimo de mantener la fecha del 21 de Diciembre para el solsticio de invierno, propondremos al papa corregir el desfase que existía en aquel momento. Dado que habían pasado 1.257 años desde el concilio de Nicea ($1582-325=1257$) el desfase era exactamente de 10 días. En efecto, según la corrección del calendario juliano, vigente hasta el siglo XVI, el año duraba 365,25 días. Pero en realidad, el año trópico hemos visto que duraba 365,242. Es decir, había un retraso de 11 minutos y 15 segundos por día ($0,008 \text{ días/año} \times 1257 \text{ años} = 10 \text{ días}$).

Eran por tanto necesario dos cosas:

- Corregir el desfase de 10 días
- Corregir la duración del calendario para que no hubiera más desfases

Al jueves “juliano” 4 de octubre de 1582 le sucede el viernes “gregoriano” 15 de octubre de 1582. **¡Diez días desaparecen** debido a que ya se habían contado de más en el calendario juliano! De hecho, Santa Teresa murió el mismo día 4 de octubre y se enterró al día siguiente, ¡el 15 de octubre!

La propuesta para corregir la duración del calendario fue que los años 1600, 2000, 2400, etc. fueran bisiestos pero el resto no lo fueran. Es decir, los años 1700, 1800 y 1900 no serían bisiestos aunque les correspondiera según el calendario Juliano (no hay 29 de Febrero en esos años). El calendario gregoriano quita por tanto 3 días al calendario juliano cada 400 años, haciendo una corrección de 0,0075 días por año (aún queda un resto de 0,0005 días/año sin corregir...). Este error producirá un desfase de 1 día cada 2,000 años en el futuro.

Los primeros países en adoptar el calendario actual fueron España, Italia y Portugal en 1582. Sin embargo, Gran Bretaña y sus colonias americanas no lo hicieron hasta 1752.

PRACTICA:

Con la app SOLAR WALK intenta colocarte en la fecha del 10 de octubre de 1582. ¡Verás que la aplicación salta del 15 al 4 de Octubre!

Por tanto, cuando se habla de fechas históricas anteriores a octubre de 1582 nos estamos refiriendo a fechas del calendario juliano. Y cuando hablamos de fechas históricas posteriores a 1582 nos referimos al calendario gregoriano.

PRACTICA:

Con la app SOLAR WALK puedes ver cómo los años 1700, 1800 y 1900 **no** son bisiestos, mientras que el año 1600 y 2000 sí lo fueron.

Puedes comprobar también que los años 1500, 1400, 1300, 1200, 1100, 1000, 900, etc.... son bisiestos (años todos ellos anteriores a la reforma Gregoriana)

PENSAR:

¿Por qué el día fue dividido en 24 h?

La respuesta no tiene su origen en nada astronómico. Fijémonos en los dedos de la mano, con la palma hacia arriba. Lo primero que nos llama la atención es que nuestros dedos están claramente divididos en tres falanges, y nuestro dedo gordo puede alcanzar cada una de ellas con facilidad. Por eso contar con los dedos dio origen al sistema en base 12 y también al sistema en base 10.

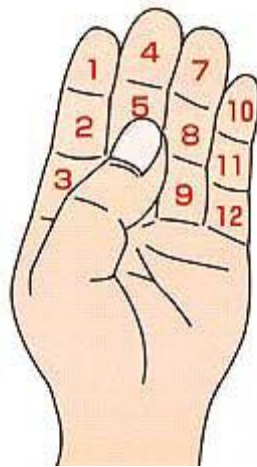


Figura 1

Este sistema numeral ha quedado para siempre en la manera en que dividimos el tiempo (24 horas).

Pero ¿Por qué la hora se divide en 60 minutos y 60 segundos? El número 60 es el primero en ser divisible entre 6, 5, 4, 3, 2 y 1 y esto permitía que fuera mucho más fácil construir las distintas medidas de los ángulos. Tengamos en cuenta que el tiempo, en realidad, es lo que tarda la Tierra en girar sobre sí misma un determinado ángulo. Por eso la hora tiene 3,600 segundos y la circunferencia tiene 360 grados y cada grado 60 minutos. Todo ello tiene su origen en las culturas mesopotámicas y egipcia.

PENSAR:

¿Por qué se produce el verano y el invierno?

Lo primero que responden algunas personas a esta pregunta es que en verano la Tierra se encuentra más cerca del Sol y en invierno se encuentra más lejos. Pero cuando esa persona tiene oportunidad de viajar al otro hemisferio se da cuenta de que cuando en el hemisferio norte es verano, en el hemisferio sur es invierno y viceversa. Es imposible que el hemisferio norte esté cerca del Sol y que el hemisferio sur esté lejos.

La verdadera causa se encuentra en la inclinación del eje de giro de la Tierra. El eje de giro de la Tierra es una línea imaginaria que va del Polo Norte al Polo Sur. El extremo norte de este eje está apuntando en la actualidad a la estrella Polar. Este eje está inclinado en relación con el plano que describe la Tierra alrededor del sol (este plano se llama **plano de la eclíptica**).

La clave para recibir más o menos calor del sol no es tanto la cercanía o lejanía. La clave es que el plano en el que habitas esté lo más expuesto posible al sol. En los polos los rayos del sol entran excesivamente oblicuos y por eso hace tanto frío. En el ecuador los rayos entran totalmente verticales y por eso hace tanto calor.

Si el eje fuera totalmente perpendicular al plano de la eclíptica, en ese caso no habría ni verano ni invierno y viviríamos todos en una eterna primavera, como se muestra en la figura. De hecho la palabra clima deriva del griego “klimat” que significa inclinación.

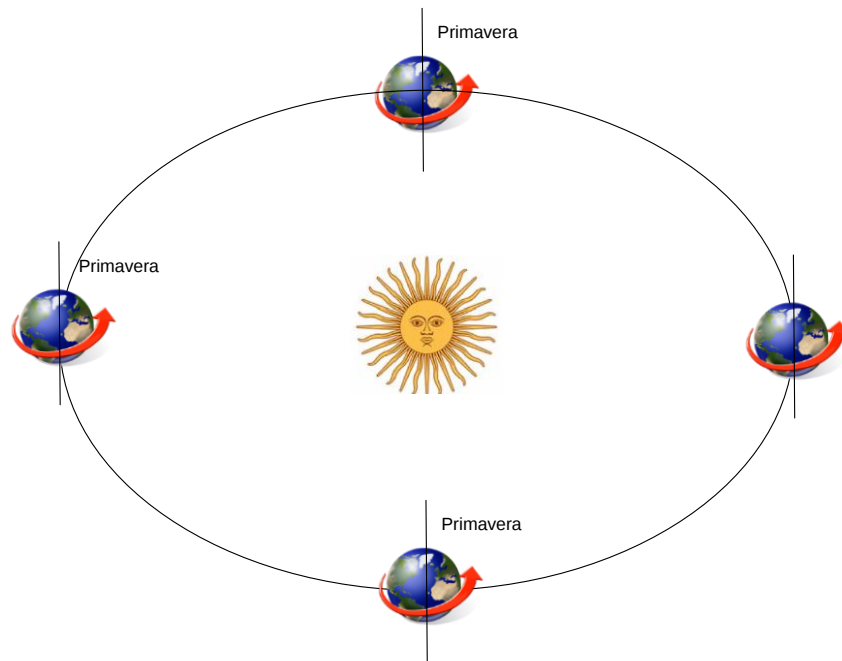


Figura 2: Explicación gráfica: si el eje de la Tierra estuviera siempre perpendicular al plano de la eclíptica viviríamos en una eterna primavera.

Pero el eje de la Tierra en realidad no está “en posición vertical” respecto al plano de giro alrededor del Sol. El eje está inclinado $23,4^\circ$ de forma que cuando el extremo norte del eje está inclinado hacia el Sol (junio) es verano en el hemisferio norte y cuando el extremo sur está inclinado hacia el Sol (diciembre) es verano en el hemisferio sur. Todo ello con independencia de la distancia de la Tierra al Sol.

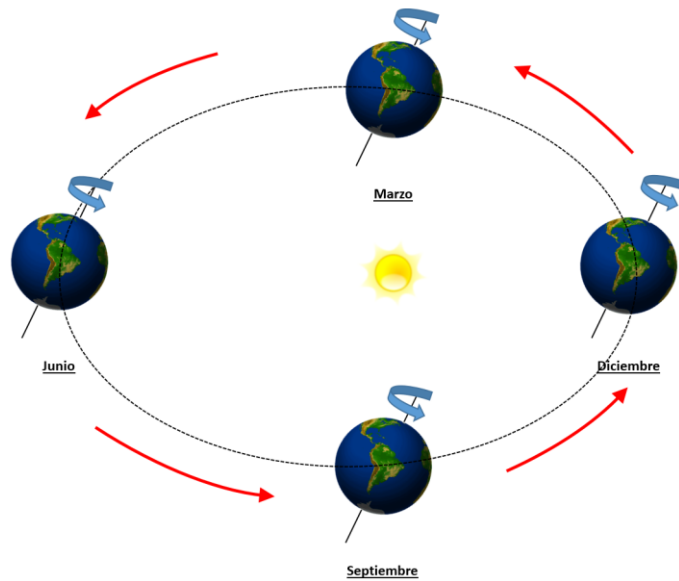


Figura 3: Explicación gráfica. El eje de la Tierra está inclinado y ésta es la causa de las estaciones. Por razones didácticas dibujaremos la Tierra siempre inclinada hacia la derecha. De manera que en Diciembre la Tierra siempre estará a la derecha del sol, y en Junio a la izquierda. Siempre representaremos por tanto a la Tierra girando alrededor del sol en el **sentido contrario** a las agujas del reloj, con el Norte hacia arriba. La Tierra girará alrededor de sí misma en el sentido de **"desatornillar"** un tornillo.

Con este gráfico lo explicaba Copérnico

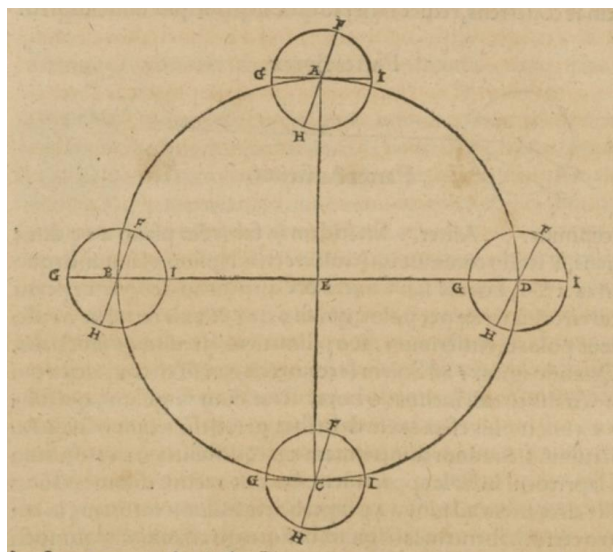


Figura 4: Con este gráfico explicaba Copérnico la inclinación del eje de la Tierra, y las estaciones. Explica también el giro de la Tierra alrededor del sol.

En Junio los rayos inciden de forma más perpendicular sobre el hemisferio norte y por esta razón es verano. Es el solsticio de verano (21 de Junio). En Septiembre es el equinoccio de otoño (22 de Septiembre). En Diciembre es el solsticio de invierno (21 de Diciembre) y en Marzo es el equinoccio de primavera (20 de Marzo).

PRACTICA:

Con la app SOLAR WALK puedes ver que en el año 325, año del Concilio de Nicea, el equinoccio de primavera se daba el 20 de Marzo.

1250 años después, en el año 1575, debido al desajuste e imperfección del calendario Juliano, el equinoccio de primavera se había movido al 10 de Marzo.

Tras el ajuste realizado en Octubre de 1582 (saltan 10 días de Octubre), el equinoccio de primavera vuelve a suceder el 20 de Marzo en 1583. Y desde entonces ahí ha quedado bien ajustado hasta ahora.

Curiosamente, en el hemisferio norte, el momento de más calor del verano no es el 21 de Junio, que es cuando los rayos inciden más poderosamente, sino un mes más tarde. Esto es debido al fenómeno de la inercia térmica: la Tierra está fría después del invierno y tarda en calentarse y no llega a la máxima temperatura hasta Julio. Lo mismo ocurre en invierno, el momento de más frío no es el 21 de Diciembre sino un mes más tarde (la tierra tarda en enfriarse).

Pero, si la Tierra gira en torno al Sol formando una elipse, surge una nueva duda, es obvio que a veces estará más cerca del Sol y otras veces más lejos. ¿En qué momento se encuentra la Tierra más cerca del Sol y cuándo se encuentra más lejos?

En el hemisferio Norte se da una circunstancia aparentemente paradójica: cuando la Tierra se encuentra más lejos del Sol es verano y cuando se encuentra más cerca es invierno. Lo contrario ocurre en el hemisferio sur.

RECORDAR:

El plano en el que se mueve la tierra alrededor del sol se llama “**plano de la eclíptica**”

PENSAR:

¿Por qué los días son más largos en verano y las noches más cortas?

Como hemos dicho, el 21 de Junio el polo Norte de la tierra está inclinado hacia el sol.

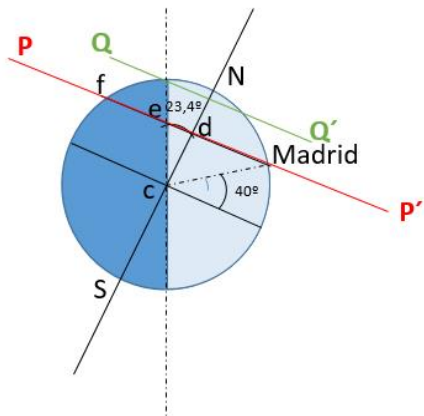


Figura 5

Podemos ver en la figura como todos los que “viven” más al norte del círculo polar ártico (línea QQ´) no tendrán noche ese día.

Vemos además que los días en el hemisferio Norte van a durar más porque están más tiempo en la zona iluminada. Mientras que la noche durará menos.

EJERCICIO:

¿Cuánto dura el día y cuánto la noche en Madrid el 21 de Junio? Madrid tiene una latitud de 40°N

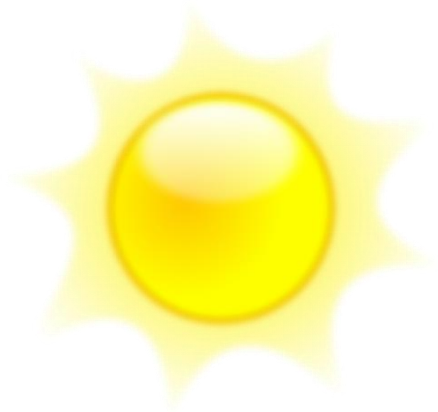
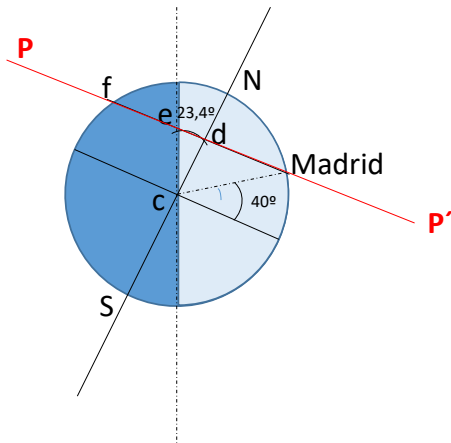


Figura 6

Para este ejercicio tendremos que conocer algunos conceptos elementales de trigonometría.

$$cd = R \times \text{sen } 40^\circ$$

$$ed = R \times \text{Tang } 23,4^\circ$$

Ahora hacemos una sección del globo terrestre por el plano P-P' y obtenemos la siguiente figura, donde se muestra en azul oscuro la parte no iluminada por el sol, y en azul claro la parte iluminada por el sol:

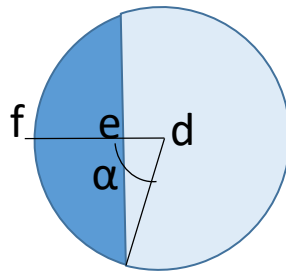


Figura 7

Nuestro objetivo es hallar cuánto vale el ángulo α

$$\alpha = \arccos(ed/fd)$$

$$fd = R \times \cos 40^\circ$$

Una vez que sabemos α , sabemos que Madrid permanecerá oscuro lo que tarda la Tierra en girar sobre sí misma un ángulo igual a 2α . Dado que tarda 24 horas en girar sobre sí misma 360° . Será de noche un tiempo igual a:

$$T_{\text{noche Madrid}} = 24h \times (2\alpha / 360^\circ)$$

Haciendo los cálculos tenemos:

$$\alpha = \arccos(0,3608) = 68,85^\circ$$

$$T_{\text{noche Madrid}} = 24 \times 2 \times 68,85 / 360 = 9,18 \text{ horas}$$

La noche en Madrid el día 21 de Junio dura 9,18 horas y el día 14,82 horas.

EJERCICIO:

¿Cuánto dura el día y cuánto dura la noche en el Ecuador el día 21 de Junio? ¿y el día 21 de Diciembre?

Sin hacer ningún cálculo, solo con ver las figuras debes comprender que en el ecuador los días y las noches siempre duran lo mismo, cualquier día del año. Es decir, duran 12 horas.

Comprendemos ahora que la inclinación del eje de la Tierra tiene unas consecuencias importantísimas en la vida en nuestro planeta.

3. LA ECLIPTICA

Veamos ahora cómo se ven todos estos cambios de posición del sol desde la Tierra. Cuando la Tierra va girando alrededor del sol, las estrellas que se ven detrás de él van siendo distintas. En Enero vemos al sol en Capricornio, en Febrero vemos al sol en Acuario, en Marzo en Piscis, en Abril en Aries, en Mayo en Tauro, en Junio en Géminis, en Julio en Cáncer, en Agosto en Leo, en Septiembre en Virgo, en Octubre en Libra, en Noviembre en Escorpio, en Diciembre en Sagitario.

Pensemos un momento en esta figura porque es importante.

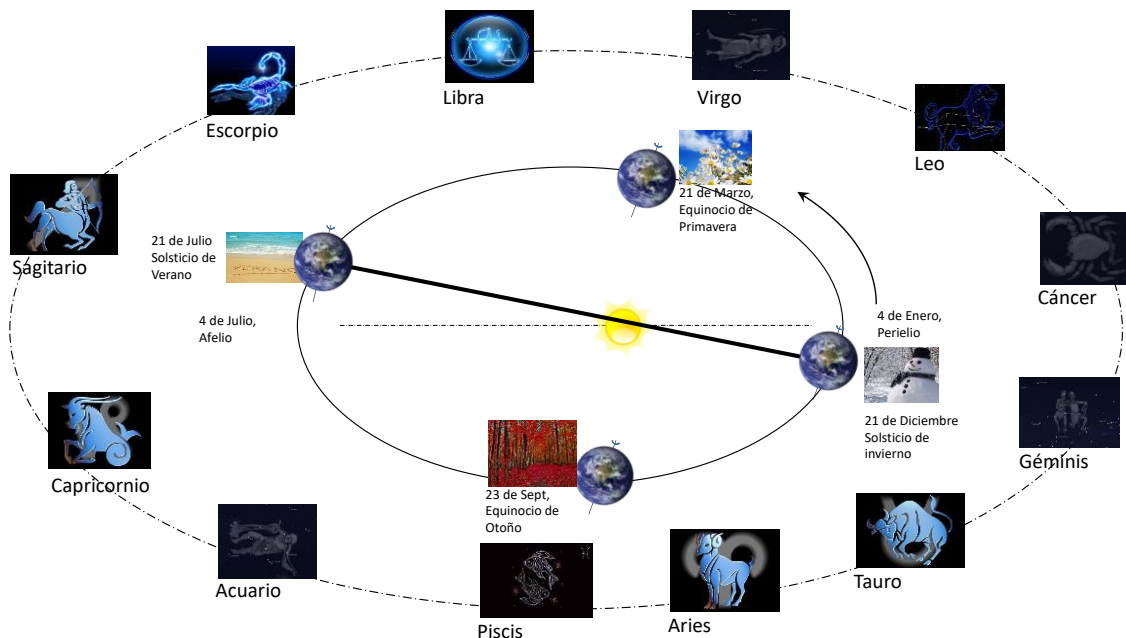


Figura 8

IMPORTANTE: En Mayo la tierra está lejos de Tauro pero ve al sol en Tauro, por eso decimos que Tauro corresponde a Mayo. En agosto la tierra está justo en el lado opuesto de Leo, pero vemos al sol en Leo, por eso decimos que Leo corresponde a Agosto.

Por tanto, lo que la humanidad ha visto siempre, es que el sol a lo largo del año iba cambiando su posición y se iba moviendo poco a poco de una constelación a otra. ¡Pero ojo!, porque por el día no eran capaces de ver las estrellas, por tanto lo que en

realidad veían era que cuando el sol estaba en Leo (en Agosto) por la noche tenían Aquarius en lo más alto a las 12:00 de la noche. Y cuando el sol estaba en Sagitario (en Junio) por la noche veían a Geminis en lo más alto a las 12:00 de la noche.

PRACTICA:

Con la app SOLAR WALK puedes ver que todos los planetas se encuentran en el mismo plano. Ese es el plano por donde gira la tierra, y por donde gira la luna. Es el plano de la eclíptica. Por eso será en la eclíptica donde encontraremos siempre al sol, a los planetas y a la luna

Con la app STAR WALK puedes practicar cambiando la fecha y viendo como el sol está cada vez en una constelación, según pasan los meses del año.

Si has practicado con la app STAR WALK habrás podido descubrir que el sol va trazando una línea en el cielo, esa línea es la eclíptica, que es en realidad la intersección del plano de giro de traslación de la Tierra con el fondo de estrellas. La eclíptica es por tanto una línea imaginaria que pasa por cada una de las constelaciones que antes hemos dicho: Capricornio, Acuario, Piscis, etc....

Bien, pues el sol siempre lo veremos desde la Tierra en algún punto de esa línea.

4. DECLINACION, ANGULO HORARIO, ALTURA Y AZIMUT, MERIDIANOS Y PARALELOS

Posicionar un punto en el globo terrestre es muy sencillo. Para ello es necesario entender que la tierra la dividimos en líneas imaginarias llamadas paralelos y meridianos.

Los paralelos, como su nombre indica, son paralelos al ecuador. Y los meridianos son círculos que pasan por el polo Norte y el Polo Sur.

Si los dibujas en el globo debe quedarte algo así:



Figura 9

Fíjate bien en el dibujo. Verás que los paralelos no miden todos lo mismo. Y los meridianos si miden todos lo mismo. Sé que todo esto puede parecer obvio pero las consecuencias a las que llegaremos no son obvias en absoluto.

Bien. Para posicionar cualquier lugar P dentro del globo es necesario dar dos coordenadas. Si llamamos C al centro de la tierra, la Latitud, es el ángulo que forma la línea P-C con el plano del ecuador. Y la longitud es el ángulo que forma el meridiano que pasa por P con el meridiano de Greenwich (que va de Norte a Sur pasando muy cerca de Londres y relativamente cerca de Madrid).

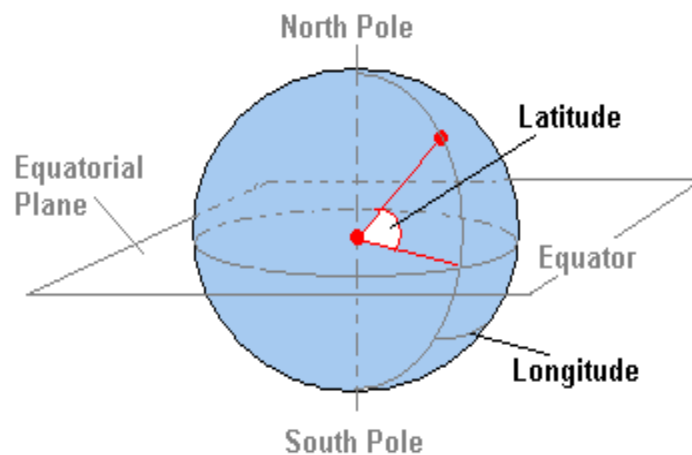


Figura 10

Todos los puntos dentro de un mismo paralelo tienen la misma latitud. Y todos los puntos dentro de un mismo meridiano tienen la misma longitud.

Hay cuatro paralelos que son muy especiales:

- Trópico de cáncer: Es el paralelo que tiene una latitud de $23,4^{\circ}$ N
- Trópico de capricornio: Es el paralelo que tiene una latitud de $23,4^{\circ}$ S
- Círculo polar ártico: Es el paralelo que tiene una latitud de $(90-23,4=66,6^{\circ})$ N
- Círculo polar antártico: Es el paralelo que tiene una latitud de $66,6^{\circ}$ S

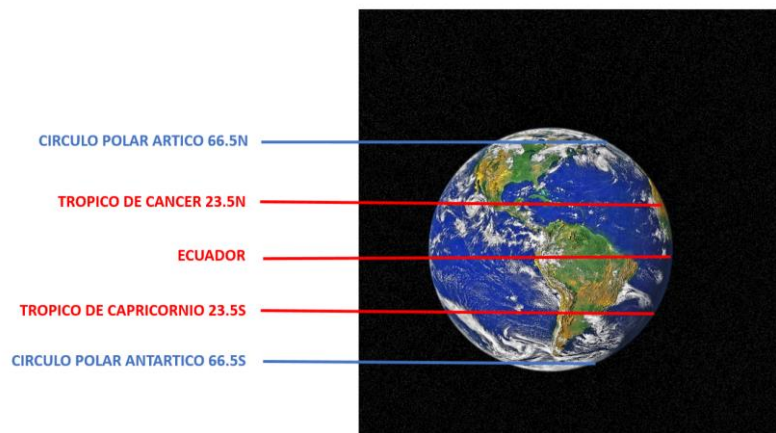


Figura 11

El posicionamiento de las estrellas es algo más complicado.

Es el momento de explicar un concepto absolutamente necesario. Se trata del concepto de **declinación**. La declinación del sol es el ángulo que forma este astro con el plano del ecuador. Si nos fijamos en la siguiente figura, que corresponde al día 21 de Junio (solsticio de verano en el hemisferio Norte), ¿sabrías calcular cuál es la declinación del sol?

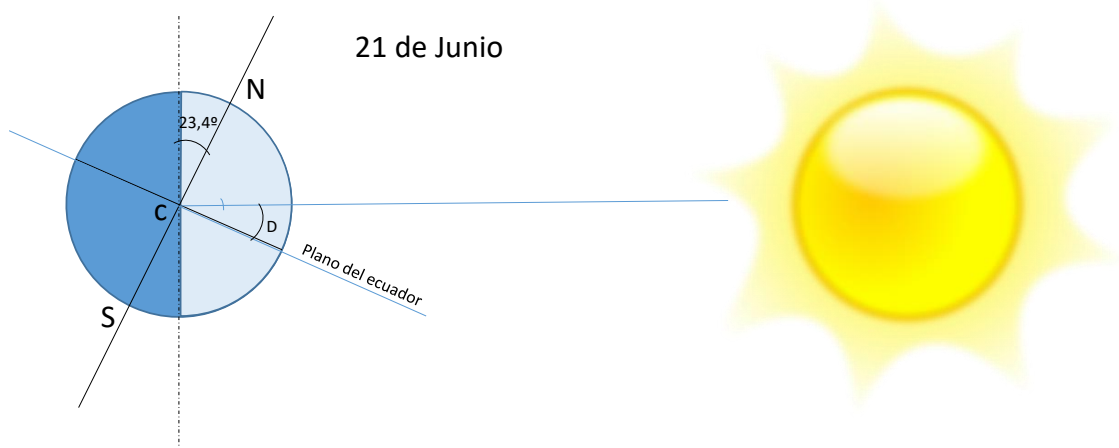


Figura 12

En cuanto lo pienses un poco te darás cuenta que el ángulo D (declinación) en el solsticio es el mismo que el de la inclinación del eje de la tierra, es decir el sol el 21 de Junio tiene una declinación de $23,4^\circ$ Norte.

EJERCICIO:

Intenta construir dibujos equivalentes a este en las posiciones del solsticio de invierno, equinoccio de primavera y equinoccio de otoño. ¿Cuál es la declinación del sol en cada caso?

Si lo has hecho correctamente te saldrán dibujos así:



Figura 13

Declinación del sol en el solsticio de invierno = $23,4^\circ$ Sur ($-23,4^\circ$)

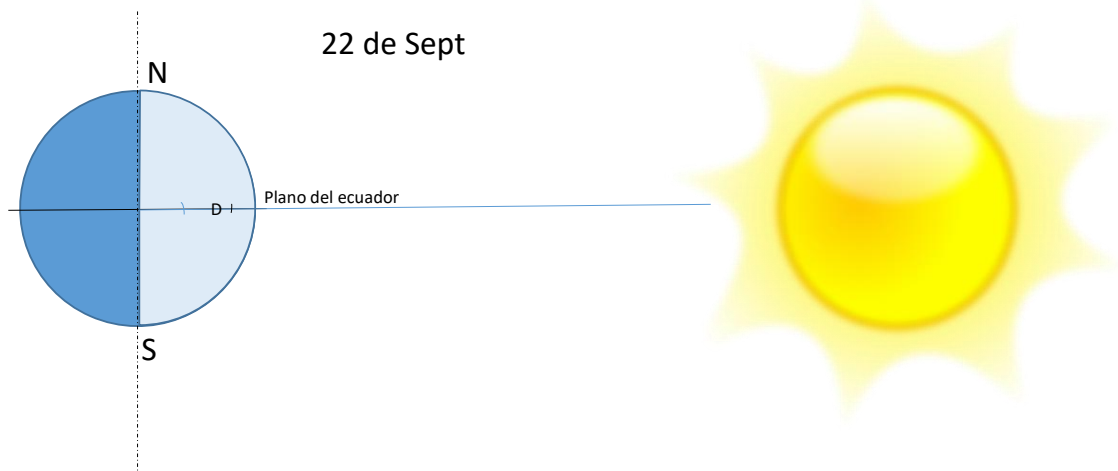


Figura 14

Declinación del sol en el equinoccio de otoño = 0°



Figura 15

Declinación del sol en el equinoccio de Primavera = 0°

La otra coordenada importante que debemos conocer es el Angulo Horario.

El Angulo Horario es el ángulo que forma la estrella con el meridiano de nuestra posición. Por ejemplo, si son las 12:00 de la mañana (hora solar) el ángulo horario del sol en ese momento es 0. Si son las 0:00h (hora solar) el ángulo horario del sol es 12 horas. El ángulo horario crece hacia el Oeste porque es hacia donde se mueven los astros con el giro de rotación de la tierra.

Conociendo la declinación y el ángulo horario es posible posicionar al sol. En realidad equivale a saber el día y la hora. Estas mismas coordenadas valen para cualquier astro.²

Si ahora pensamos cuál es la declinación de una estrella, veremos que a lo largo de todo el año, y durante muchísimos años la estrella tendrá siempre exactamente la misma declinación. Esto es debido a que el movimiento de la Tierra alrededor del sol es tan pequeño en comparación con la distancia de las estrellas que podemos considerar que el plano del ecuador es siempre el mismo.

² Téngase en cuenta que la declinación no depende del lugar en el que estamos, pero el ángulo horario sí. En el mismo momento a la misma hora el sol tendrá la misma declinación para todos los habitantes de la tierra, pero no tendrá el mismo ángulo horario.

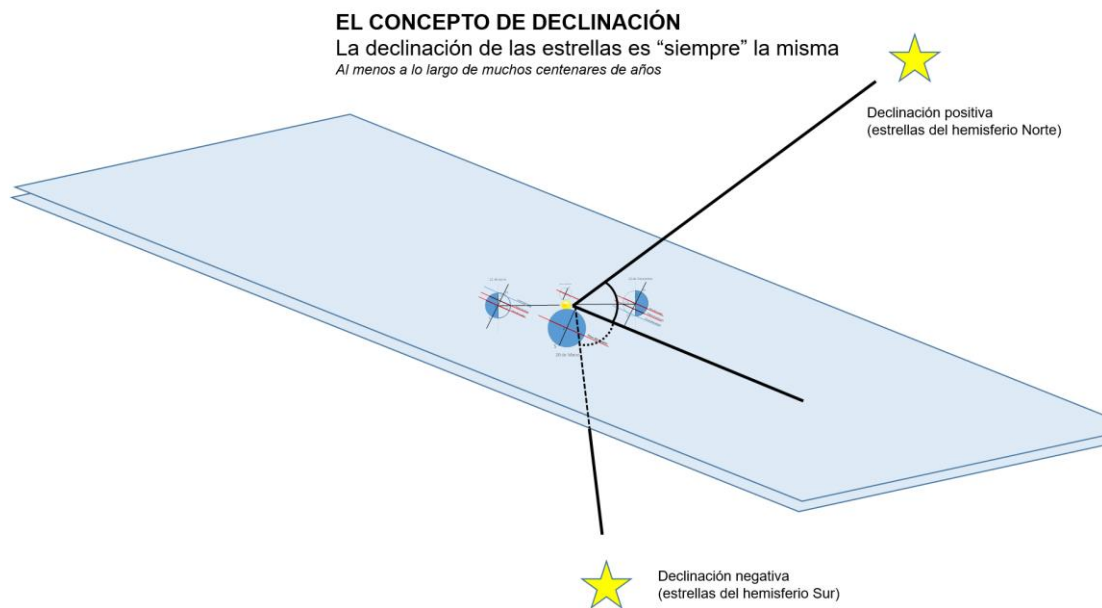


Figura 16

EJERCICIO:

¿Cuál es la declinación y el ángulo horario del sol en Madrid el 21 de Junio a las 12:00 h (hora solar)? ¿y en sus antípodas ese mismo día en ese mismo momento?

Ya hemos visto que la declinación del sol el 21 de Junio es de $23,4^{\circ}$ Norte. En Madrid, a las 12:00 (hora solar) el ángulo horario es 0° . Pero en las antípodas será de 12h.

Bien. Sin embargo, existe otra forma de posicionar a los astros que es más utilizada pero no más importante. Se trata del Azimut y la Altura.

La Altura es el ángulo que forma el astro respecto al horizonte. El Azimut es el ángulo que forma la proyección del astro en el horizonte con el Norte del lugar.

Cuando un astro alcanza una altura de 90° se dice que está en el cenit. Es realmente incómodo observarlo porque lo tendríamos justo encima de nuestra cabeza.

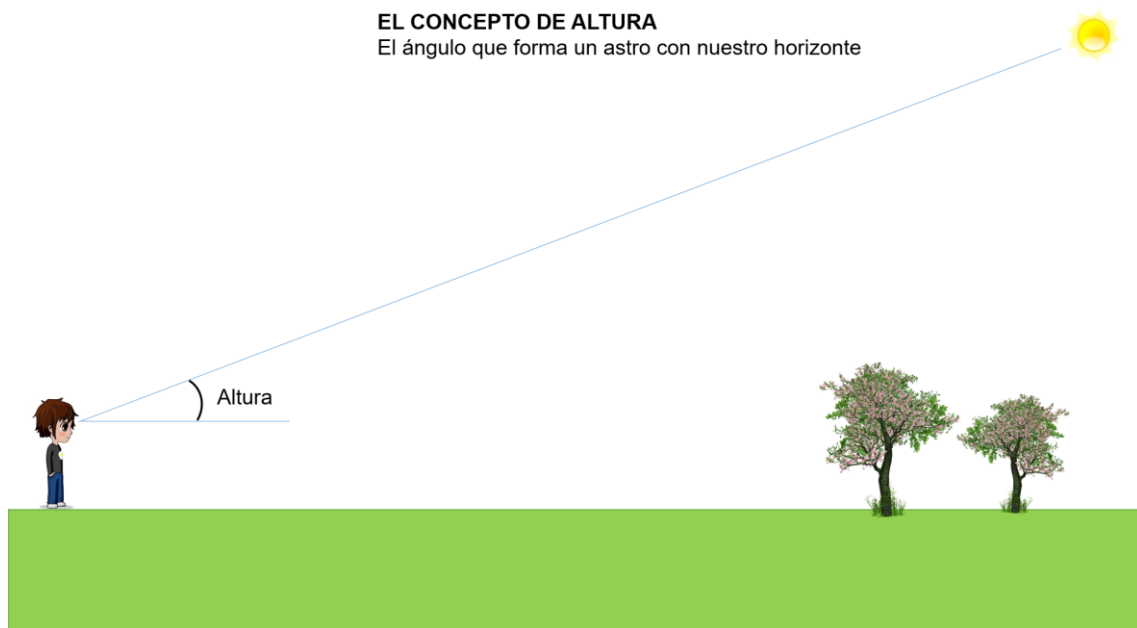


Figura 17

EJERCICIO:

¿Cuál es la declinación de la estrella Arturo el día 3 de Marzo a las 12:00? ¿y a las 21:00? ¿y el 20 de Julio?

Si entramos en la App Star Walk podremos comprobar que en todo momento la declinación de la estrella Arturo es la misma: $19^{\circ} 11'$

¿Por qué?

En realidad esto ocurre con cualquiera de las estrellas. Tengamos en cuenta que la declinación es el ángulo que forma nuestra visual de la estrella con respecto al plano del ecuador (que es lo mismo que 90° menos el ángulo que forma la visual con el Norte). Dado que el Norte a lo largo de centenares de años se mantiene mirando a la misma estrella (muy cerca de la Polar hoy en día), el plano del ecuador es por tanto invariable. No cambia la orientación del plano del ecuador mientras la tierra gira sobre sí misma, y tampoco cambia mientras gira alrededor del sol. Dado que las estrellas fijas son, a nuestros efectos, puntos fijos en el universo (aunque se muevan están tan lejos que no lo apreciamos), el ángulo que forma nuestra visual con la estrella fija respecto al plano del ecuador es siempre constante³.

Por tanto, recordemos. Las estrellas fijas mantienen su declinación a lo largo de muchos centenares de años. Solo irá variando según vaya apuntando el eje de la Tierra a otros lugares distintos de la estrella polar en un ciclo que dura 25,000 años (ya explicaremos esto).

El sol, aunque es una estrella fija, dado que giramos alrededor de él, cambia el ángulo de nuestra visual y por eso su declinación varía a lo largo del año.

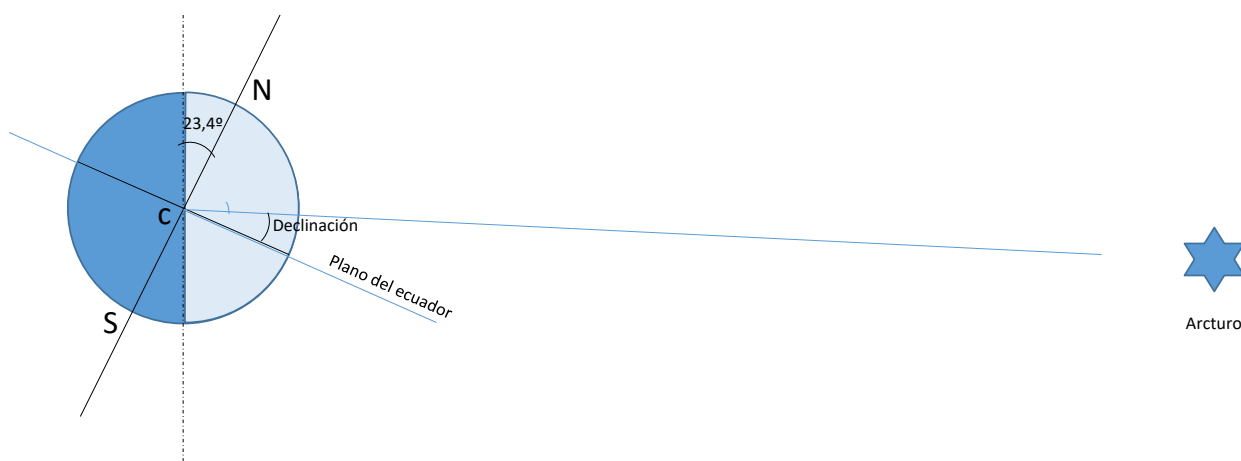


Figura 18

³ Aunque la tierra se mueva alrededor del sol, la distancia que recorremos es tan ínfima en relación con la distancia que nos separa del resto de estrellas que el ángulo de nuestra visual de la estrella no varía

EJERCICIO:

¿Cuál es el azimut y la altura del sol en Madrid el 21 de Junio a las 12:00 h (hora solar)?

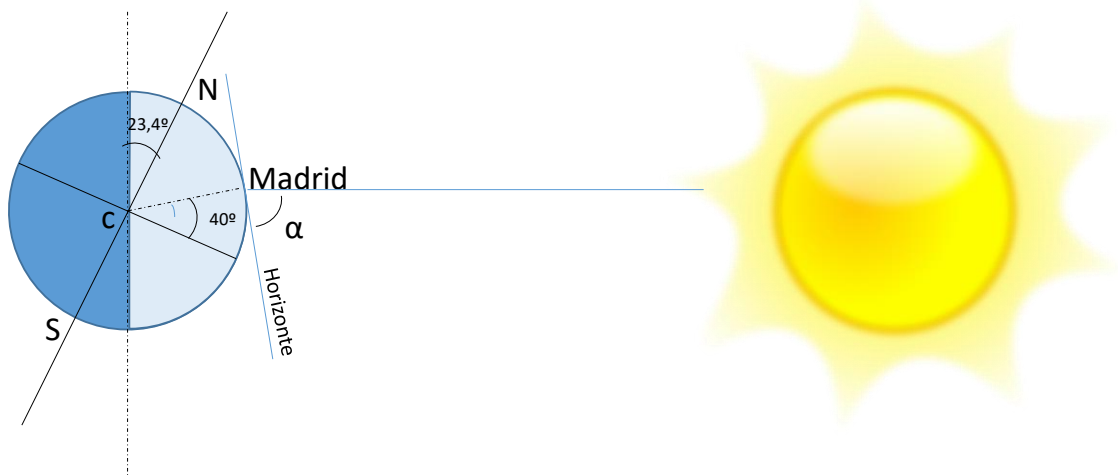


Figura 19

En el dibujo el ángulo α es exactamente la altura del sol. El 21 de Junio a las 12:00 (hora solar) el sol alcanza su máxima altura. Si alcanzara los 90° sería totalmente vertical ¿lo alcanza?

Por sencillos cálculos trigonométricos es fácil ver que la altura $\alpha = \text{dec} + (90 - \text{lat}) = 23,4 + (90 - 40,5) = 72,9^\circ$. No llega por tanto a ser vertical.

El sol en ese momento está justo en el Sur, por tanto el azimut es exactamente de 180° .

EJERCICIO:

¿Cuál es la altura del sol el 21 de Junio a las 12:00 h solar y a las 24:00 h solar en el círculo polar ártico, el círculo polar antártico, el trópico de cáncer y el trópico de capricornio?

Si has hecho bien los dibujos te saldrá que la altura del sol el 21 de Junio es:

Altura del sol en el solsticio de Junio	12:00 h	24:00 h
Círculo polar ártico	46,8	0
Trópico de cáncer	90	-
Trópico de capricornio	41,2	-
Círculo polar antártico	0	-

Explicuemos el primer caso por su importancia. Imaginemos que estamos en un lugar P que tiene una latitud de $23,4^\circ$, por ejemplo en La Ponia finlandesa. En el dibujo marcamos como P12 su situación esquemática a las 12:00h y como P24 su situación esquemática a las 24:00h (después de haber girado la Tierra 180° sobre sí misma):

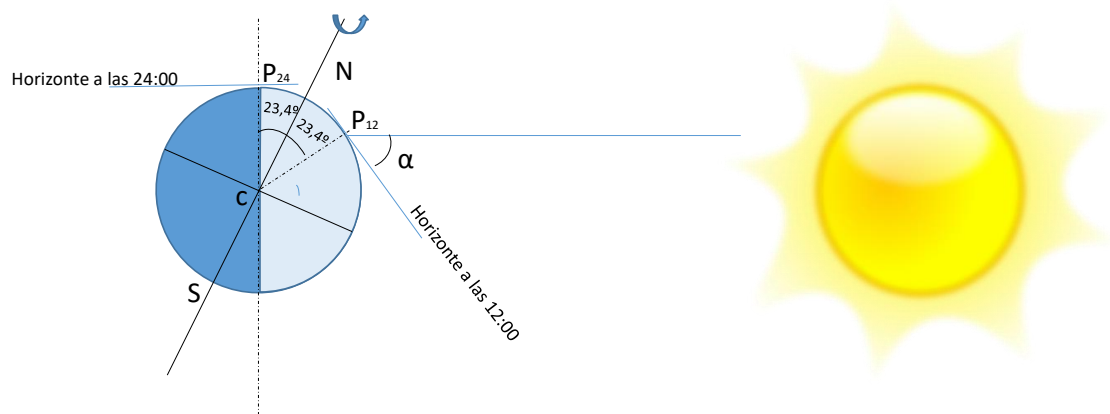


Figura 20

El ángulo α (altura) en P12 será igual a $23,4+23,4 = 46,8^\circ$

El ángulo α en P24 será 0° , es decir el sol estará justo en el horizonte.

Esto tiene mucha importancia y quiere decir que más al Norte del Círculo Polar Ártico el sol no se pone por la noche en los días cercanos al solsticio de verano (son días sin noche).

Fijémonos también que el sol alcanza una altura muy considerable en el solsticio de verano (46,8), de hecho alcanza más altura que la que consigue en las selvas tropicales del trópico de capricornio ese mismo día.

Sin embargo, en el círculo polar antártico sucede lo contrario. Ni siquiera a las 12:00 consigue verse el sol (que tiene una altura de 0° y está justo en el horizonte). Esto significa que más al sur del círculo polar Antártico el sol no se ve en todo el día cuando estamos en los días cercanos al solsticio (son noches permanentes sin día).

Estos fenómenos tienen importantes consecuencias climáticas y marcan climas extremos más allá de cada círculo polar (clima polar).

También tiene importancia analizar que en el trópico de cáncer el sol alcanza una altura totalmente vertical en el solsticio de verano, es decir alcanza una altura de 90° (está justo en el cenit). Más al Norte del trópico de Cáncer el sol nunca alcanza el cenit y esto tiene importantes repercusiones climáticas también. Entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio tendremos un clima tropical.

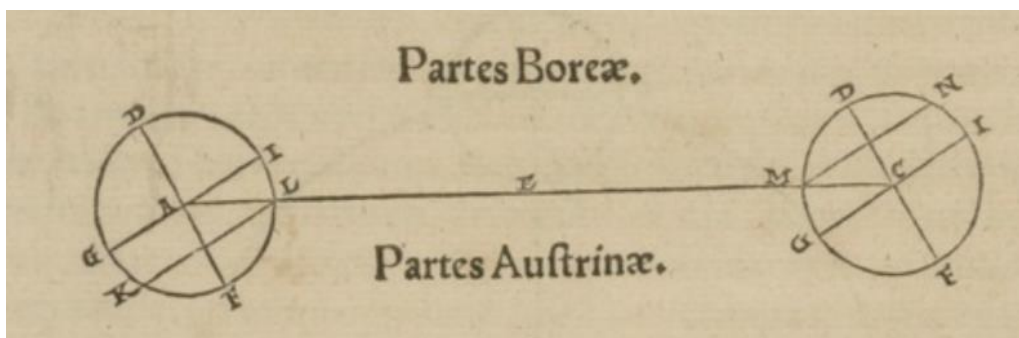


Figura 21: Explicación del trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio por Copérnico.

4.1 La esfera armilar

La esfera armilar fue inventada por Eratóstenes para poder conocer la posición exacta de los astros en cada momento del día y del año. Esta que a continuación presentamos sirve para conocer la posición del sol.

Esta máquina funciona considerando que la Tierra está en el centro del universo y que una esfera gigante (que contiene todas las estrellas fijas) gira alrededor de ella. El plano horizontal de la máquina muestra el horizonte y los puntos cardinales (N, E, S y O). El eje de giro de esta esfera gigante está inclinado formando un ángulo con el horizonte que coincide con la latitud del lugar. Si estamos en el Polo Norte el eje de giro sería totalmente vertical (latitud 90°) y si estamos en el ecuador, el eje de giro sería totalmente horizontal (latitud cero). La máquina del dibujo debía ser inglesa porque el ángulo de latitud del eje de giro está levantado respecto a la horizontal algo más de 50° (latitud del lugar).

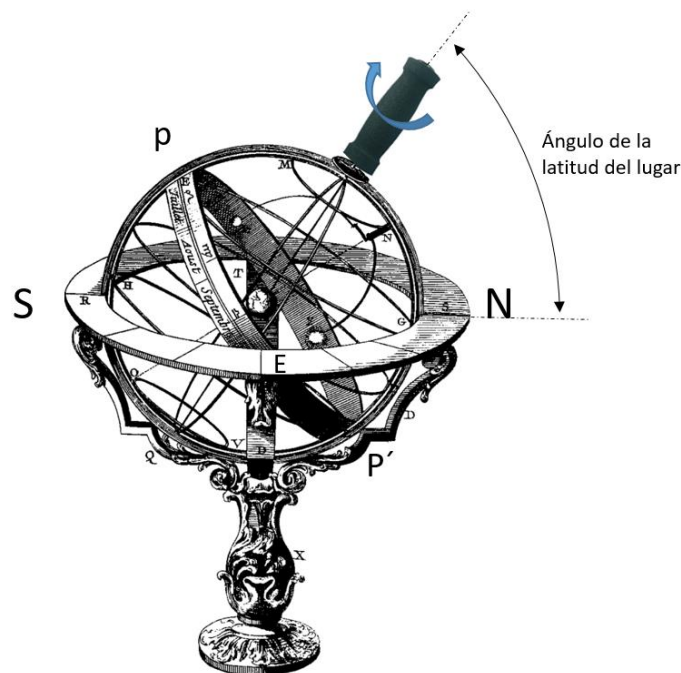


Figura 22: Esfera armilar. From Wikimedia Commons, the free media repository.

En el dibujo se muestra una manilla que hemos incluido para hacer más gráfico el eje de giro. Se ven los puntos cardinales N, E, S en el plano del horizonte. Y se ve la eclíptica que pasa por P y P'. El 21 de Junio el sol estará en P. Después poco a poco irá “declinando” por la eclíptica hasta llegar al punto P' el 21 de Diciembre.

Dibujemos ahora cómo se mueve la máquina a lo largo de todo el día del 21 de Junio y qué trayecto aparente hace el sol en el horizonte.

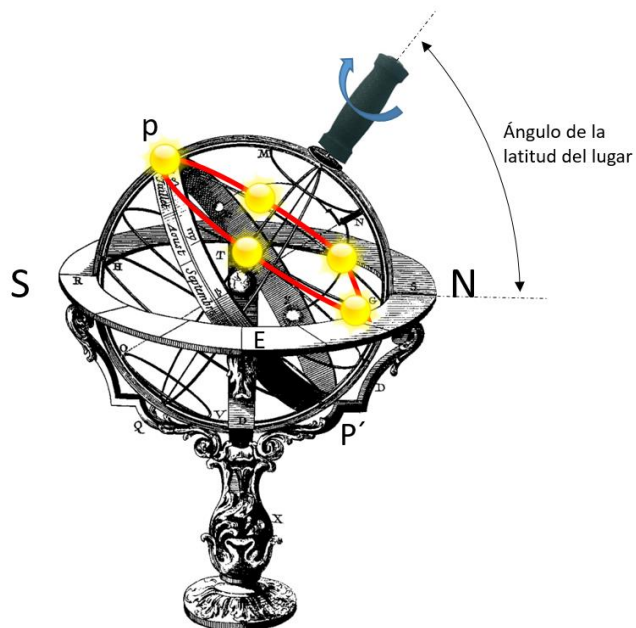


Figura 23: Esfera armilar marcando la trayectoria aparente del sol sobre el horizonte el día 21 de Junio.

Vemos que al estar en el máximo de declinación (solsticio de verano) y tener una latitud alta, el trayecto del sol es casi todo el día por encima del horizonte (la noche durará poco).

Veamos ahora qué ocurre cuando estamos en el solsticio de invierno (declinación negativa). El sol habrá descendido por la eclíptica hasta el punto P'. Vemos en el siguiente gráfico que la mayor parte del recorrido del sol es por debajo del horizonte y solo sale muy poco rato en las horas centrales del día sin apenas alcanzar una altura razonable. El invierno allí será frío.

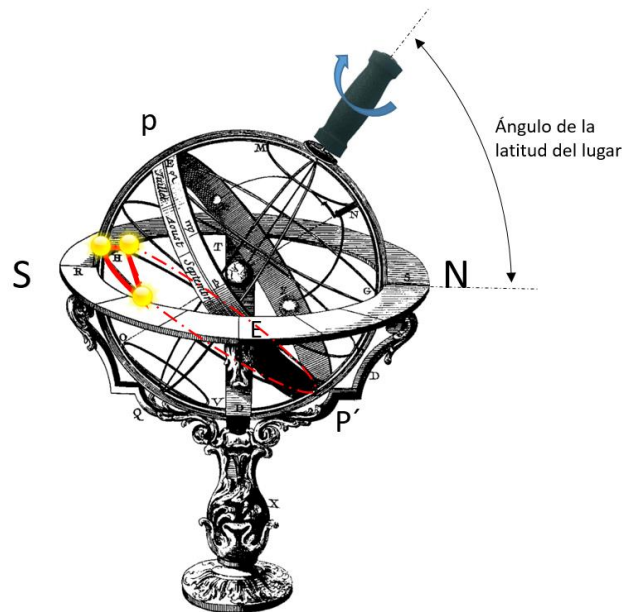


Figura 24: Esfera armilar marcando la trayectoria aparente del sol sobre el horizonte el día 21 de Diciembre.

EJERCICIO PRÁCTICO:

¿Cuál es la mejor de las orientaciones para tu casa si vives en Madrid?

Para poder responder a esta pregunta te interesa conocer por dónde sale el sol y por donde se pone exactamente. Tanto en verano como en invierno. Quizás consideras agradable que durante el invierno el sol te dé en la habitación en la madrugada. O quizás quieres evitar que el sol te dé en la puesta de sol en verano porque te estaría dando de lleno en la ventana y tu cuarto podría alcanzar altas temperaturas.

¿Por dónde nace el sol el día del solsticio de verano en Madrid?

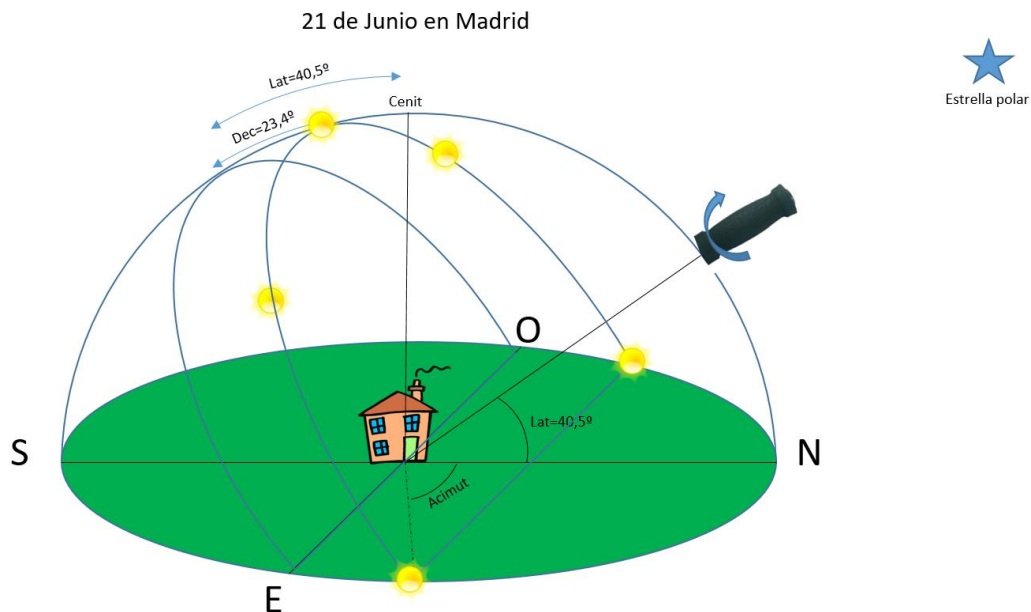


Figura 25

Este dibujo representa el horizonte de Madrid con el trayecto que hace el sol durante el día del 21 de Junio (solsticio de verano). La máxima altura que alcanza es $Alt_{max}=90^{\circ}-(Lat-Dec)$, es decir, $90^{\circ}-(40,5^{\circ}-23,4^{\circ})=72,9^{\circ}$

Este dibujo es realmente práctico e intuitivo. Es en realidad el mismo esquema que el de la esfera armilar. La manivela que aparece en el dibujo sería la que utiliza el dios Helio para mover el sol desde que nace hasta que se pone. Nótese que la manivela apunta a la estrella polar. Esto ocurrirá siempre en cualquier lugar del hemisferio Norte, donde todo parece girar alrededor de esta estrella. Esto se debe a que el eje de giro de la tierra está siempre apuntando a la estrella polar (dentro de unos capítulos matizaremos esta afirmación porque con el paso de milenios el eje va ligeramente modificándose).

Si nos fijamos en el dibujo el sol no sale por el Este, sino por el NE. En concreto sale por un acimut de 59° , es decir, 31° más al Norte que el Este. Y por supuesto se pone 31° más al Norte que el Oeste (en el NO).

Estos valores del azimut son fácilmente calculables con pocos conocimientos de trigonometría. Aquel que quiera entretenerse puede intentar demostrar que el valor del Acimut del punto de salida del sol ese día en Madrid es el siguiente:

Madrid. 21 de Junio de 2017. Amanecer		
Dec	23,43	0,4089316
Lat	40,4	0,70511467
Sen(dec)	0,397629249	
cos(dec)	0,917546174	
cos(lat)	0,761537239	
tg(lat)	0,851069552	
$h = \text{sen}(\text{dec}) / \text{cos}(\text{lat})$	0,522140256	
$x = \text{tg}(\text{lat}) * \text{sen}(\text{dec})$	0,338410147	
$\text{Hipot} = \text{raiz}(\text{cosdec} * \text{cosdec} - x * x)$	0,852859633	
$\text{Az} = \text{arctg}(\text{hipot} / h)$	1,021437793	59,3367702

Hagamos lo mismo para el día del solsticio de invierno.

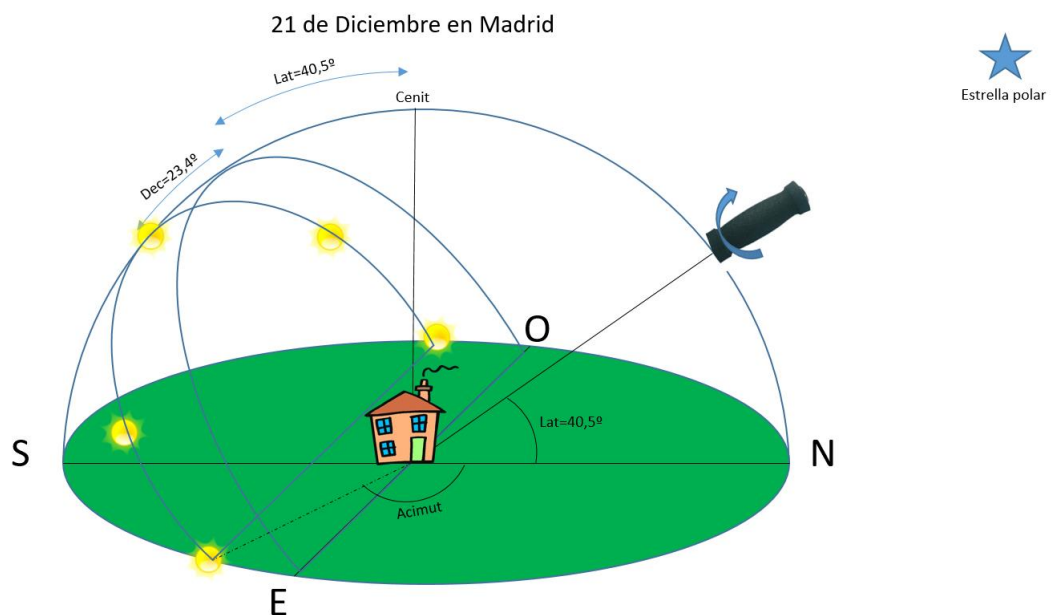


Figura 26

Este dibujo representa el horizonte de Madrid con el trayecto que hace el sol durante el día del 21 de Diciembre (solsticio de invierno). La máxima altura que alcanza es $90^\circ - (\text{Lat} - \text{Dec})$, es decir, $90^\circ - (40,5^\circ + 23,4^\circ) = 26,1^\circ$

Si nos fijamos en el dibujo el sol no sale por el Este, sino por el SE. En concreto sale 31° más al Sur que el Este. Y por supuesto se pone 31° más al Sur que el Oeste (en el SO).

Madrid. 21 de Junio de 2017. Amanecer		
Dec	-23,43	-0,4089316
Lat	40,4	0,70511467
Sen(dec)	-0,397629249	
cos(dec)	0,917546174	
cos(lat)	0,761537239	
tg(lat)	0,851069552	
$h = \text{sen}(\text{dec}) / \text{cos}(\text{lat})$	-0,522140256	
$x = \text{tg}(\text{lat}) * \text{sen}(\text{dec})$	-0,338410147	
$\text{Hipot} = \text{raiz}(\text{cosdec} * \text{cosdec} - x * x)$	0,852859633	
$\text{Az} = \text{arctg}(\text{hipot} / h)$	-1,021437793	-59,3367702

Como vemos la diferencia entre el verano y el invierno es realmente notable. Es especialmente sorprendente la escasa altura máxima que alcanza el sol, solo $26,1^\circ$, casi la misma altura que alcanza en el polo Norte en el solsticio de verano. Esto unido a que solo lo vemos durante nueve horas provoca un invierno realmente frío.

Entonces, ¿cuál es la mejor orientación en Madrid?

Orientación de mi vivienda	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SUR	Será una maravilla recibir los rayos del sol de Madrid en invierno, que entrarán bastante horizontales (porque no se eleva mucho). Por otra parte, dado que en verano el sol sale por el NE y se pone por el NO no nos dará el sol nada más que en las horas centrales del día, pero al estar tan alto bastará con un toldo para protegernos	En verano el sol puede calentar excesivamente la pared y puede hacer demasiado calor
ESTE	En invierno nos dará el sol al amanecer y será agradable que desde las primeras horas del día nos esté calentando. Además en verano tendremos la ventaja de que en las horas más calurosas (4:00 pm) no nos da el sol	En verano nos dará el sol muchísimas horas toda la mañana hasta las 14:00
OESTE	Recibiremos sol en invierno al atardecer	Esta es la peor orientación para el verano porque recibiremos muchísimas horas de sol totalmente directo a la habitación en los momentos más calurosos del día.
NORTE	En verano no nos dará apenas el sol. Solo en el amanecer y en el atardecer de manera oblicua.	Estaremos seis meses sin ver el sol en ningún momento.

Figura 27

En los equinoccios de Otoño y Primavera el sol sí sale por el Este y se pone exactamente por el Oeste (en cualquier parte del mundo).

Vemos a continuación cómo evoluciona el lugar por donde se pone el Sol según pasan los deliciosos días de un verano en La Coruña, Galicia.

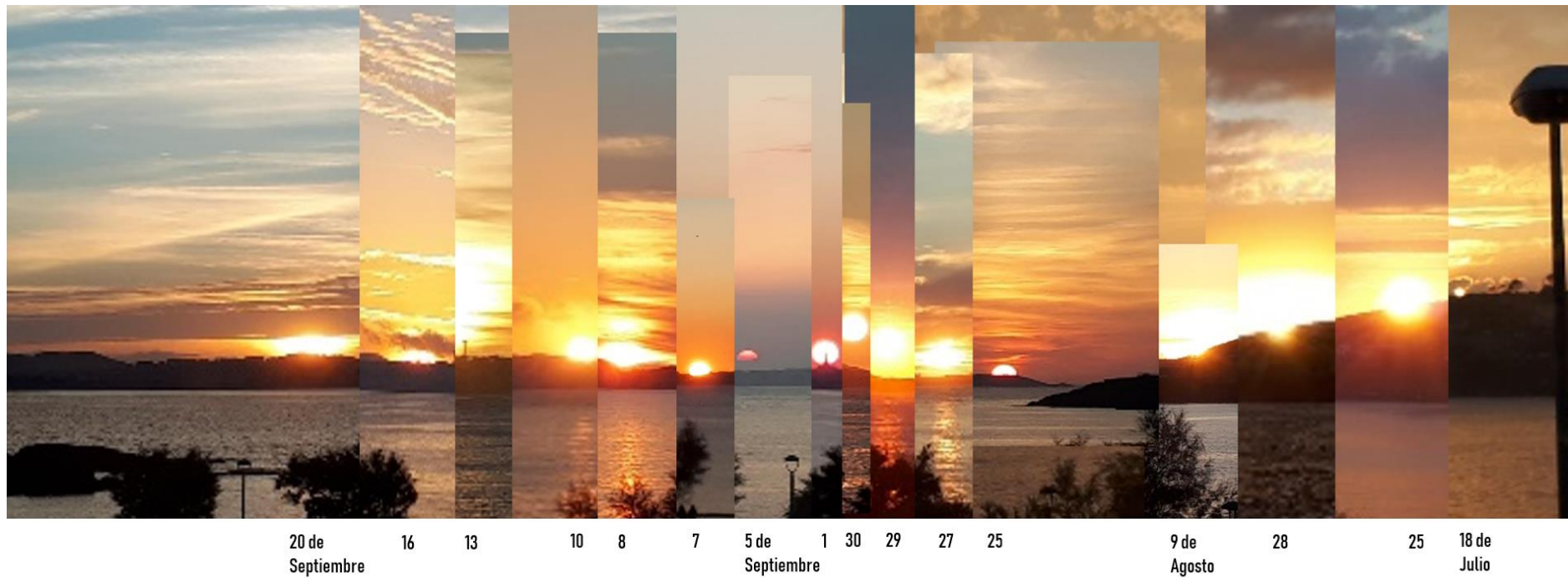


Figura 28

Aquí podemos ver numerosas puestas de sol en Galicia durante el verano. En frente se ve La Coruña. La puesta de sol va moviéndose desde el Noroeste hasta que justo se pone exactamente por el Oeste el día 20 de Septiembre. Si siguiéramos haciendo fotos el sol seguiría poniéndose cada vez más a la izquierda hasta llegar al máximo del Suroeste en el solsticio de invierno

(Fotos por gentileza de Maria Luis Iglesias).

EJERCICIO PRÁCTICO:

¿Qué día del año se hizo esta foto?



Figura 29

Es muy fácil ver, comparándola con las fotos del montaje anterior, que se hizo en el 27 de Agosto. La foto se tomó cuando el sol iba disminuyendo su declinación desde que el 20 de Junio (solsticio de verano) alcanzó su máximo, es decir 68 días después del solsticio.

¡Pero ojo! También pudo haberse hecho la foto cuando el sol iba aumentando su declinación al pasar el equinoccio de Otoño (68 días antes del solsticio), es decir el 13 de Abril.

Es decir, cada puesta de sol tiene su equivalencia con dos días del año, simétricos respecto a los solsticios.

EJERCICIO PRÁCTICO:

¿En qué época del año hizo Goya este cuadro de la Ermita de San Isidro de Madrid?



Figura 30

Para poder responder a esta pregunta, lo primero que caemos en la cuenta es que el sol se está poniendo en el horizonte, por lo alargado de las sombras de las personas, pero sobre todo porque el suelo horizontal de los balcones apenas proyectan sombras, indicio de que el sol está muy bajo en el horizonte.

Entramos en Google Maps y vemos la orientación de la Ermita.

Si hacemos clic en “modo 3d” en google maps, esto es lo que vemos.



Figura 31

La Ermita vista desde satélite tiene esta orientación. Es totalmente Este-Oeste, como la mayoría de las iglesias antiguas de España.



Figura 32

La línea de puntos suspensivos es la alineación de las dos esquinas de la iglesia que se ven en el cuadro. Vemos que toda esa parte de la fachada Norte está en sombra, por lo tanto el sol, cuando Goya pintó el cuadro, debía de estar poniéndose en un azimuth menor de $270+29,23$, es decir menor de $299,23^\circ$. Pero desde luego en un azimuth mayor que el Oeste total (270°) puesto que la fachada Norte posterior está totalmente iluminada por el sol en el cuadro de Goya.

Calculamos hace poco que el azimuth al amanecer del 21 de Junio (solsticio de verano) en Madrid era de $59,34^\circ$. Por tanto el del atardecer es de $360-59,34= 300,66^\circ$. Es decir el día del solsticio se pone más al Norte que la orientación marcada por la línea de puntos. Esto quiere decir que en los días cercanos al solsticio la fachada norte estaría iluminada en la parte más cercana a la entrada.



Figura 33: De haberse pintado el cuadro en el solsticio de verano, estaría iluminada la parte más occidental de la fachada Norte, como se ve en el dibujo.

Por tanto el cuadro se pintó entre primeros de Abril (algunos días pasado el equinoccio de Primavera) y mediados de Junio. Por la fuerza con que está iluminada la fachada Norte, tiene pinta de que estamos más cerca de mediados de Junio que de principios de Abril (fecha en que el sol daría a la fachada Norte demasiado oblicuamente iluminando la fachada muy débilmente).

Pero ¡ajo! También pudo haberse pintado entre principios de Julio y mediados de Septiembre (unos días antes del equinoccio de Otoño).

En realidad se pintó el 15 de Mayo, fecha de la celebración de San Isidro en Madrid (al menos el primer boceto al aire libre se realizó en dicha fecha).

EJERCICIO PRÁCTICO:

¿Cómo es el movimiento del sol el día 21 de Junio en un punto del trópico de cáncer?
¿y en el polo Norte? ¿y en un punto del círculo polar ártico?

Para construir el dibujo primero debemos recordar que el trópico de cáncer tiene una latitud de $23,4^\circ$ Norte. Por tanto la “manilla” que hace girar el universo debe estar más inclinada ($23,4^\circ$ respecto al horizonte), de hecho, en efecto, la estrella polar la encontraremos siempre a esa altura en el Norte.

Consideramos ahora que la declinación ese día 21 de Junio es $23,4^\circ$ positiva y por tanto el sol estará esos grados desplazado hacia el Norte respecto al plano perpendicular de la manilla.

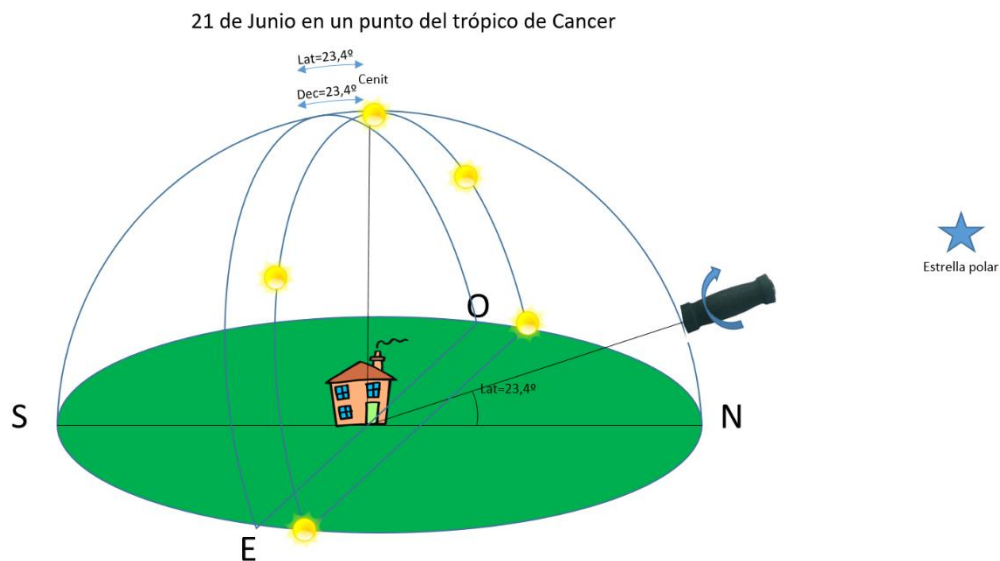


Figura 34

Fijémonos que, por el hecho de tener la manilla más inclinada hacia abajo (latitud menor), el sol describe una trayectoria mucho más vertical. Ese día 21 de Junio en el trópico de cáncer el sol pasa justo por el cenit.

Veamos qué ocurre en el Polo Norte el día 21 de Junio. Dado que el polo Norte tiene latitud 90° , la manilla del giro del universo estará en posición totalmente vertical. Y al ser la declinación $23,4^\circ$ el sol estará levantado respecto al plano perpendicular de la manilla justo esos grados. Es decir, ¡permanecerá durante todo el día a una altura de $23,4^\circ$!

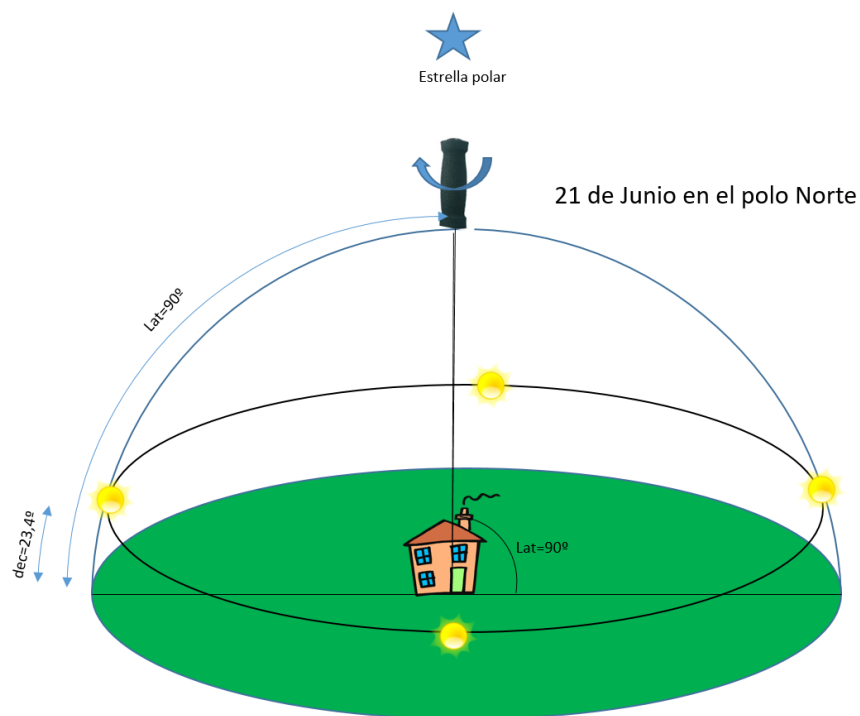


Figura 35

Por último veamos que pasa en un punto del círculo polar ártico (latitud $66,6^\circ$). Colocamos la manilla que gira el universo levantada $66,6^\circ$ respecto al horizonte. El sol lo colocamos $23,4^\circ$ por encima del plano perpendicular de la manilla.

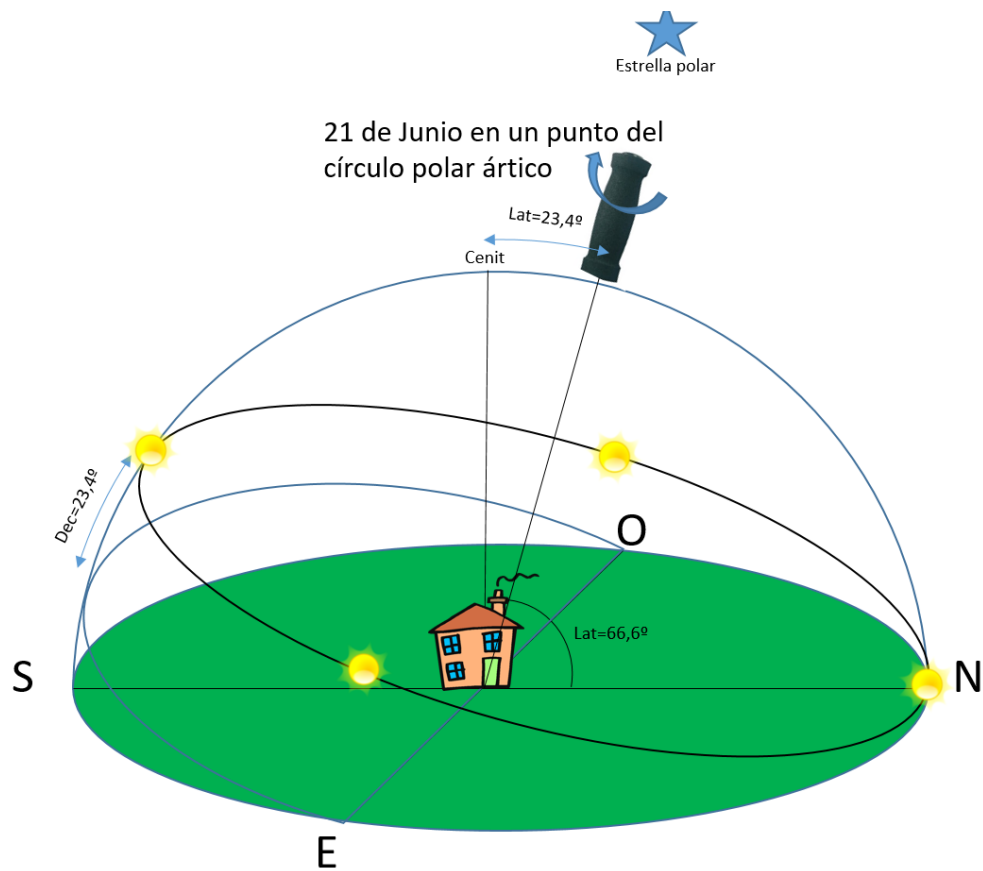


Figura 36

Vemos que el sol no se llega a poner nunca, pasando justo por el horizonte a las 24:00 horas.

5. COMO CONOCER NUESTRAS COORDENADAS. LATITUD Y LONGITUD. INTRODUCCION A LA NAVEGACION ASTRONÓMICA

Con todo lo explicado tenemos ya la capacidad de saber en qué latitud nos encontramos, qué longitud, y muchas cosas más.

PENSAR:

Estás en el siglo XVI cruzando el atlántico y varios días de tormenta han desviado tu nave y no sabes dónde te encuentras. Ha pasado el temporal y se ven las estrellas nítidamente. Te interesa sobre todo conocer tu latitud porque sabes que viajando siempre hacia el Oeste por el paralelo 23 llegas a la isla de Cuba.



Figura 37

Repasemos lo que sabemos hasta ahora a ver si podemos ayudar al capitán de la nave. Sabemos que todas las estrellas giran alrededor de la estrella polar y por tanto algunas están a veces más altas y otras veces más bajas dependiendo de la hora. Lamentablemente no tenemos reloj en el siglo XVI y no tenemos ni idea de qué hora es en el punto en el que nos encontramos.

Pero recordamos que la estrella polar es la única que no gira. Nos fijamos en ella y nos llama poderosamente la atención que la estamos viendo mucho más alta que lo que la veíamos en Sevilla. ¡Claro! ¡Eso es! Si estuviéramos en el Polo Norte veríamos a la estrella polar justo en el Cenit (encima de nuestra cabeza) todo el tiempo y tendría una altura de 90° que es justo la latitud del Polo Norte. En Madrid la veremos siempre a una altura de 40° y marcando el Norte (porque Madrid está a una latitud de 40°). Y si estuviéramos en la línea del Ecuador veríamos a la estrella polar siempre en el horizonte marcando el Norte, es decir a una altura de 0° .

Estrella polar

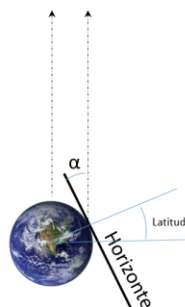


Figura 38: En el presente esquema se entiende fácilmente que el ángulo que forma la estrella polar con el horizonte (α) coincide con el ángulo que forma nuestra situación respecto al ecuador (latitud). Si nos encontráramos en el Polo Norte la Estrella Polar estaría justo encima nuestra (es decir formando un ángulo de 90° respecto al horizonte). Si estuviéramos en el ecuador veríamos la estrella polar justo en el horizonte, marcando el Norte.

Tras este razonamiento nos alarmamos un poco porque parece que nos hemos acercado excesivamente al ecuador porque la estrella polar está demasiado baja. ¿Cómo podemos medir la altura de la estrella polar?

Podemos fabricar un instrumento que tenga un tubito por el que mirar y que del centro caiga una pesa que marque siempre la vertical y con la ayuda de un transportador de ángulos (de los que tiene el capitán en la mesa de bitácora), medir el ángulo entre la visual de la estrella y la vertical.

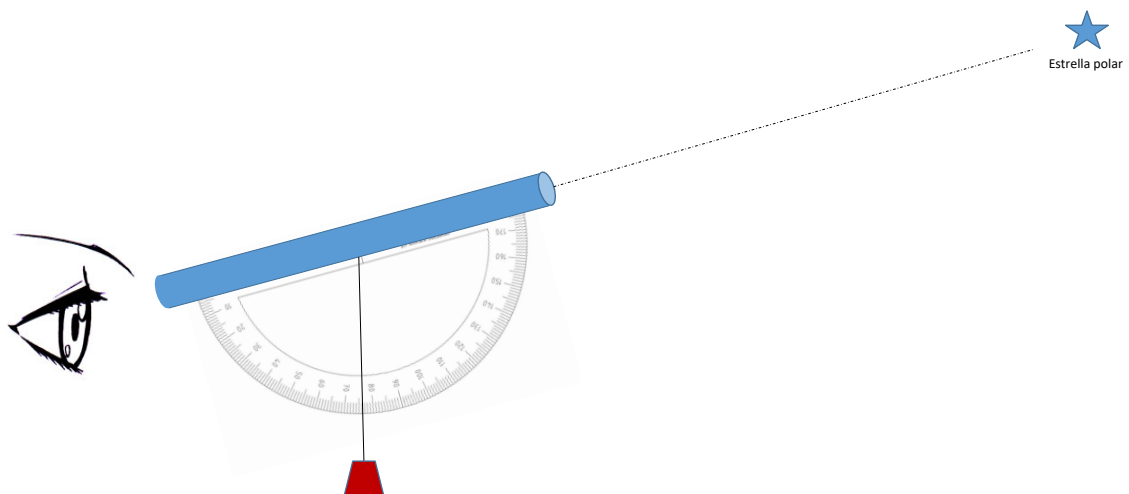


Figura 39

Acabamos de fabricar un sextante. Los de verdad tienen esta pinta:



Figura 40

Fijémonos de nuevo en el dibujo. ¿Qué medida está marcando el transportador de ángulos?

Marca 77° , ¿es esa nuestra latitud? Obviamente no. Enseguida nos damos cuenta que tal y como hemos fabricado nuestro sextante rudimentario, lo que nos está marcando no es la altura de la estrella, sino el ángulo complementario (90° -altura) porque si miro al horizonte (altura cero) el transportador marca 90° . Por tanto la altura de la estrella polar es de 13° y esa es exactamente nuestra latitud. Habrá que indicarle al capitán que vire hacia el Norte para volver a nuestro paralelo de 23° .

PENSAR:

Ahora estás en el siglo XVIII, la técnica ha avanzado mucho, pero aún no hay GPS... Estamos cruzando el atlántico y queremos realizar todo nuestro viaje por el paralelo 28 que es el de Santa Cruz de Tenerife que es desde donde hemos partido. Con el sextante hemos medido que efectivamente nos encontramos en la latitud 28, pero nuestra inquietud es que no sabemos exactamente cuánto hemos avanzado desde Tenerife. Es decir, querríamos saber cuál es nuestra longitud, ¿cómo podemos saberlo?

Este fue un gravísimo problema para la navegación astronómica durante mucho tiempo. El cálculo de la latitud se conocía desde la más remota antigüedad, pero el de la longitud era un problema mucho más complicado de resolver.

El Gobierno Británico estableció la Junta de Longitud en 1714:

"El conocimiento de la longitud es de gran importancia para la seguridad de la Armada y de los buques mercantes de Gran Bretaña; así como para la mejora del Comercio, dado que muchos navíos por desconocer su posición se han retrasado en sus viajes, y muchos se perdieron... Y habrá recompensas para la persona o personas que descubran un método para el cálculo de la Longitud."

Pero ya antes Felipe II de España había ofrecido un premio por el descubrimiento de una solución al problema de la longitud en 1567; en 1598 su hijo Felipe III aumentó el premio. Holanda se sumó al esfuerzo con un premio ofrecido en 1636. Navegantes y científicos de la mayoría de países europeos estaban al corriente del problema y participaron en la búsqueda de una solución. Debido al esfuerzo internacional en la solución del problema y la escala de la empresa, se puede considerar que el cálculo de la longitud representa uno de los mayores esfuerzos científicos de la historia.

Pensándolo un poco... ¿por qué fue tan difícil? Si sabemos la hora que tienen en Tenerife y sabemos la hora del lugar, podemos calcular la diferencia. Si la diferencia es de 2h, con un sencillo cálculo sabremos cuántos grados de longitud hemos recorrido desde Tenerife. Sabemos que la diferencia horaria entre un punto y su antípoda es de 12 horas. Como la antípoda tiene una longitud 180° mayor, eso quiere decir que por cada hora de diferencia recorreremos 15° de longitud.

¡Por tanto si la diferencia horaria es de 2h, habremos recorrido 30° ! Como la longitud de Tenerife es de 16° Oeste, nuestra posición es:

Latitud: 28° Norte

Longitud: 46° Oeste

Genial, pero... ¡Para eso necesito un reloj! En efecto, hasta que la tecnología no fue capaz de construir relojes de precisión que no se atrasaran o adelantaran con el vaivén de las olas (los de péndulo claramente no servían) no fue posible calcular la longitud en la navegación⁴.

En cualquier caso... aún queda una duda, ¿cómo puedes conocer la hora que es en el sitio desconocido en el que estás? El reloj de bolsillo te marca la hora de Tenerife pero no te marca la hora de cada lugar. ¿Cómo podemos hacerlo?

Hay diversas maneras, pero una de las mejores es midiendo frecuentemente la altura del sol con el sextante. En el momento en que la altura del sol comienza a bajar es justo el momento en que el sol está en su punto más alto. Son por tanto las 12:00 h (hora solar) del lugar. En ese momento miras tu reloj de bolsillo que marca la hora solar de Tenerife. Y con la diferencia horaria calculas la longitud.

Pero... ¿y si queremos calcular la distancia recorrida?

Cualquiera dirá que es muy fácil. Como conocemos el radio de la tierra (6350 Km) y sabemos que $2\pi R$ es la longitud de la circunferencia (360°). Haciendo una regla de tres nos sale que cada grado recorrido equivale a 110,7 Km. Por tanto los 30° recorridos equivalen a 3,323 Km.

¡¡Pero ojo!! Cuando le decimos esta cifra al capitán nos mira con escepticismo. Ha estado calculando con la corredera⁵ la velocidad del barco periódicamente y sabe que no hemos ido tan rápido. Nos dice que revisemos los cálculos.

Sin duda nos hemos equivocado en algo ¿en qué? Si hemos avanzado todo el rato por el paralelo 28° ...

⁴ El gran Galileo propuso la ingeniosa idea de fijarse en las lunas de Júpiter para calcular el tiempo realmente transcurrido desde que saliste del puerto

⁵ Fabricar una corredera rudimentaria para medir la velocidad del barco es muy fácil. Basta con tirar un cubo de agua atado a una cuerda por la popa y empiezas a contar el tiempo. Dejas que la cuerda se vaya libremente pero ligeramente tensa. Cuando lleves un minuto coges la cuerda y la marcas. Mides la cantidad de cuerda que se ha soltado y eso es lo que hemos recorrido en un minuto.



Figura 41

¡Claro! El radio de 6,350 Km solo vale para el ecuador, pero no vale para los demás paralelos que usan un radio más corto. Cuanto más al Norte estamos más corto es el radio para construir el paralelo y más cortas son las circunferencias de los paralelos.

El radio del paralelo 28° lo calculamos de la siguiente manera:

$$R_{28} = R \cos 28^\circ = 6350 \cdot 0,883 = 5,607 \text{ Km}$$

Rehaciendo nuestros cálculos anteriores nos sale que la distancia recorrida desde Tenerife es 2,934 km. Esto le cuadra mucho mejor al capitán.

Las implicaciones de esto son importantísimas. Mientras naveguemos por el ecuador, o naveguemos de Norte a Sur por un meridiano, cada grado que recorramos equivaldrá siempre a 110,7 Km. O mejor dicho, **cada minuto⁶ que recorramos equivaldrá a 1852 metros (una milla náutica)**

Fijémonos ahora en un mapa del mundo de los que vemos todos los días.

⁶ Un grado tiene 60 minutos



Figura 42

Mirémoslo bien. Fijémonos sobre todo en los paralelos que están más al Norte y más al Sur. ¡Nos daremos cuenta que están increíblemente alargados con respecto a lo que son en realidad!

De hecho, aunque la línea negra y la línea roja tienen la misma longitud en el dibujo, sin embargo las distancias que representan son ¡totalmente diferentes! ¡La distancia roja es muchísimo más grande que la negra en la realidad!

Es importantísimo que seamos conscientes de que los mapas mundis que manejamos a diario **están gravemente deformados**. Es por este motivo que cuando viajamos en avión y cruzamos el atlántico, el trayecto parece tomar una curva absolutamente ridícula, de hecho ¡para viajar de Madrid a México City pasamos más al Norte que Nueva York! Sin duda los pilotos saben lo que hacen, están tomando el camino más corto (línea geodésica), pero el mapa está deformado y deforma también las líneas.



Figura 43: ¡La distancia más corta entre Ny y Tokio es la roja!