



Principios básicos de navegación astronómica y evolución de sus instrumentos

0.- Advertencia a modo de introducción

Este modesto documento constituye una manera sencilla de abordar algunos conocimientos de la mecánica celeste y de los métodos para hallar una posición astronómica, vistos por un navegante.

El texto y los dibujos están basados en los de un cursillo de navegación astronómica realizado en los años noventa, fruto de mis experiencias de navegación de altura como oficial de marina mercante y como capitán de altura de yate de recreo.

Este documento no reemplaza en absoluto el cursillo mencionado y no tiene más pretensión que la de facilitar a las personas interesadas una mejor comprensión de las cuestiones relacionadas con la navegación astronómica y de la evolución de los métodos y los instrumentos a lo largo de los siglos.

Al ser la astronavegación una ciencia aplicada, difiere en varios puntos de la astronomía de los científicos. ¡Que los astrónomos nos perdonen ciertas infidelidades!

En un primer capítulo se describen los principios básicos de la navegación astronómica tal y como se ha practicado estas últimas décadas.

En él se hallan también diversas definiciones en relación con este tema.

A continuación se describen algunas particularidades de los astros utilizados.

Después seguiremos la evolución a lo largo del tiempo de los conocimientos y de los instrumentos.

Al final daremos unos ejemplos de cálculos.

Según los últimos conocimientos de los astrofísicos actuales, la Tierra existiría desde hace unos 4,6 mil millones de años, el Universo desde hace mucho más tiempo.

Los primeros primates habrían aparecido hace 65 millones de años y la posición vertical hace unos 13 millones de años. Hay que esperar una decena más de millones de años para a ver a los primeros bípedos, y las herramientas primitivas tendrían 2,5 millones de años.

Para hacerse una idea mejor de estas cifras, se puede imaginar que si la Tierra tuviera hoy uno de nuestros años, ha habido que esperar al último día del último mes, es decir al 31 de diciembre, para que los primeros homínidos adopten la posición vertical. A esta misma escala, las primeras herramientas mencionadas no tienen mas que 5 horas y Cristo nació hace menos de 5 segundos.

Sin embargo ya había estrellas en el cielo y las diferentes civilizaciones han tenido miles de años para observar sus movimientos, dibujar en él constelaciones e ir descubriendo poco a poco los ciclos y evoluciones de los astros, tanto fijos como errantes. Estos últimos fueron domesticados para servir al hombre de referencia geográfica, y luego de medio para determinar su situación sobre la Tierra. ¿Cuántas generaciones de observación inteligente habrán hecho falta a estos seres para que se les ocurra hincar un palo en el suelo y así observar, y luego predecir el retorno de las estaciones midiendo la longitud de la sombra proyectada? Aquí el hombre descubre la noción del tiempo y de los ciclos.



Además del descubrimiento de la verticalidad que impone la gravedad, el hombre ha determinado también que el plano del horizonte es el otro eje que le permite medir el mundo.

Para la determinación de la redondez de la Tierra, de las órbitas de los astros y la noción de las distancias astronómicas, harán falta algunos segundos más de nuestra escala anual de la edad del Planeta Azul.

Vemos que en la Antigüedad pronto ha sido posible determinar la latitud de los lugares, y cualquier marino puede hallarla sin demasiada dificultad, ya sea por medio de la duración del día o por la posición de las estrellas (Sol incluido) sobre el horizonte.

En cambio, la medida de la longitud se hace en función del tiempo, ya que la tal longitud no es más que una expresión de diferencia de tiempo entre dos lugares. Con la tecnología y la realización del cronómetro, la determinación de la longitud se volverá prácticamente un juego de niños.

Entonces, bienvenidos a bordo, largar amarras y..... ¡juguemos!

Para empesar...

El principio del sacacorchos

Para abrir una botella de vino tenemos dos posibilidades :

- Girar el sacacorchos en el sentido de las agujas del reloj, sin mover la botella
- Girar la botella en sentido contrario a las agujas del reloj manteniendo el sacacorchos bien fijo.

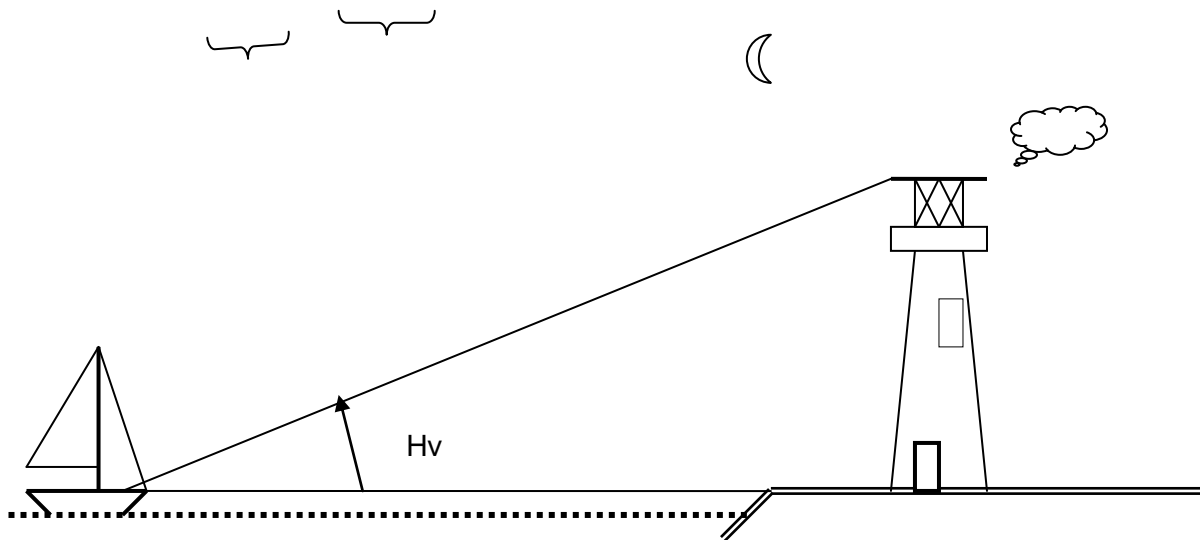
Ambas soluciones conducen al mismo resultado y una vez la botella abierta no se puede saber cuál de los dos métodos ha sido utilizado.

De la misma manera, con las estrellas y los demás astros se puede concebir la situación de dos maneras: o giran los astros al rededor de una Tierra fija, o nuestro planeta se mueve en una bóveda estrellada fija.



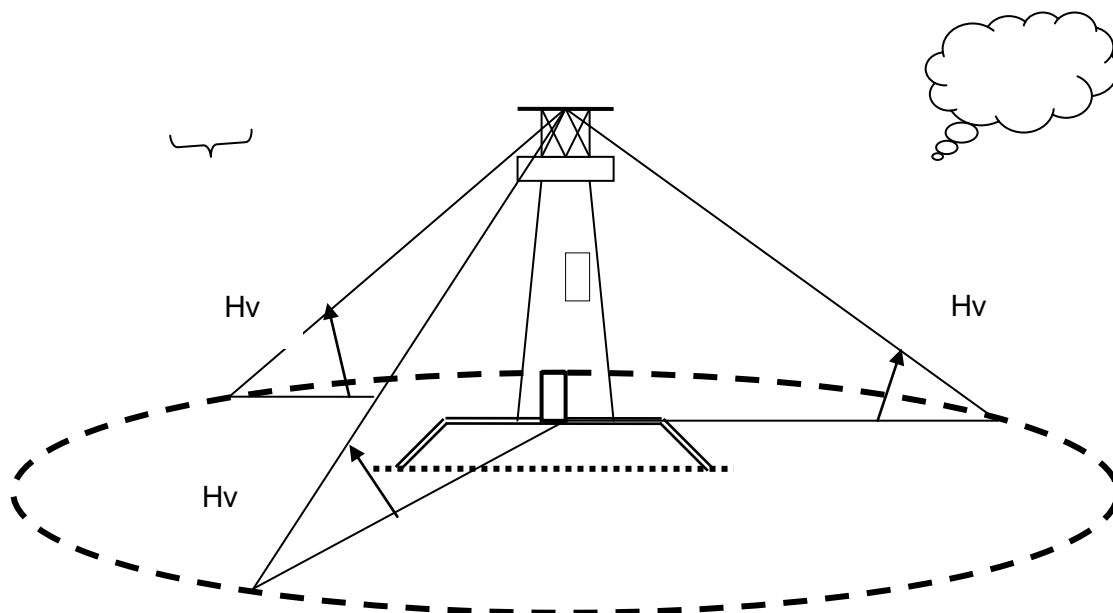
Principios básicos de navegación astronómica y definiciones

1.- Altura verdadera (H_v)



La altura de un objeto o de un astro es el ángulo vertical entre dicho objeto y el horizonte. Se puede decir que cuanto más se acerca uno al faro, más aumenta el ángulo, y según se va uno alejando de dicho faro el ángulo (o la altura) va disminuyendo. La altura verdadera corresponde prácticamente al alejamiento con respecto al objeto.

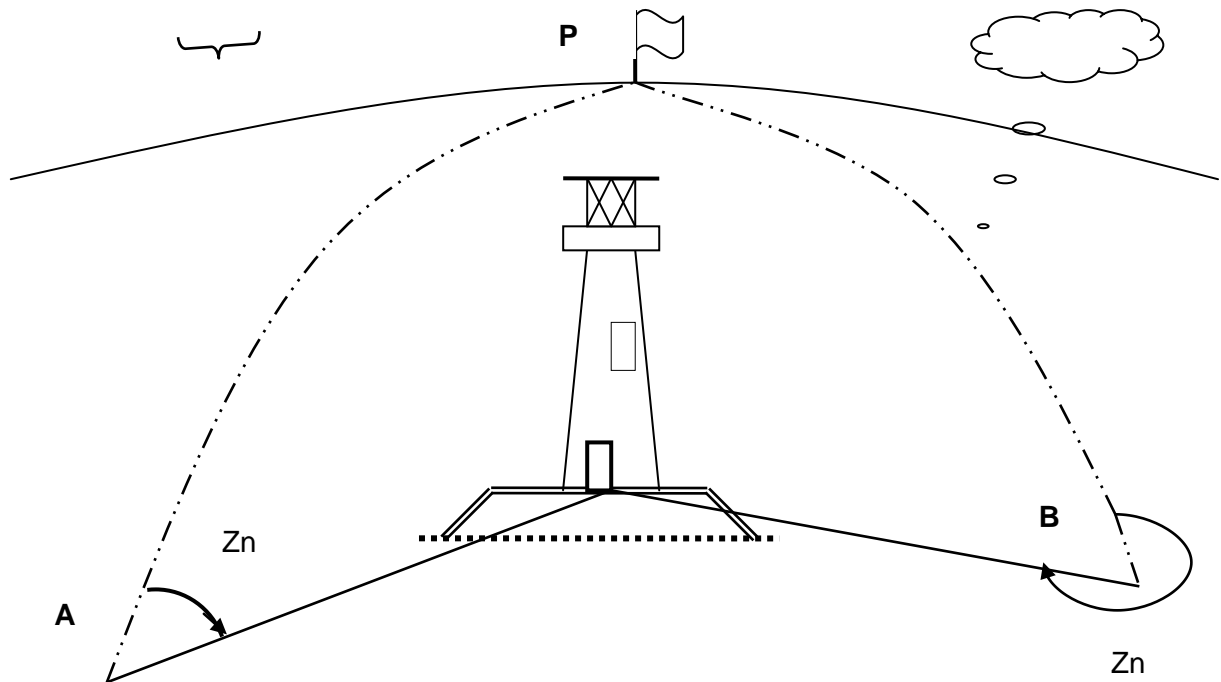
2.- Círculo de alturas iguales



Los observadores que ven el faro con la misma altura están todos situados sobre un “círculo de alturas iguales”. El centro de dicho círculo es la base del faro.

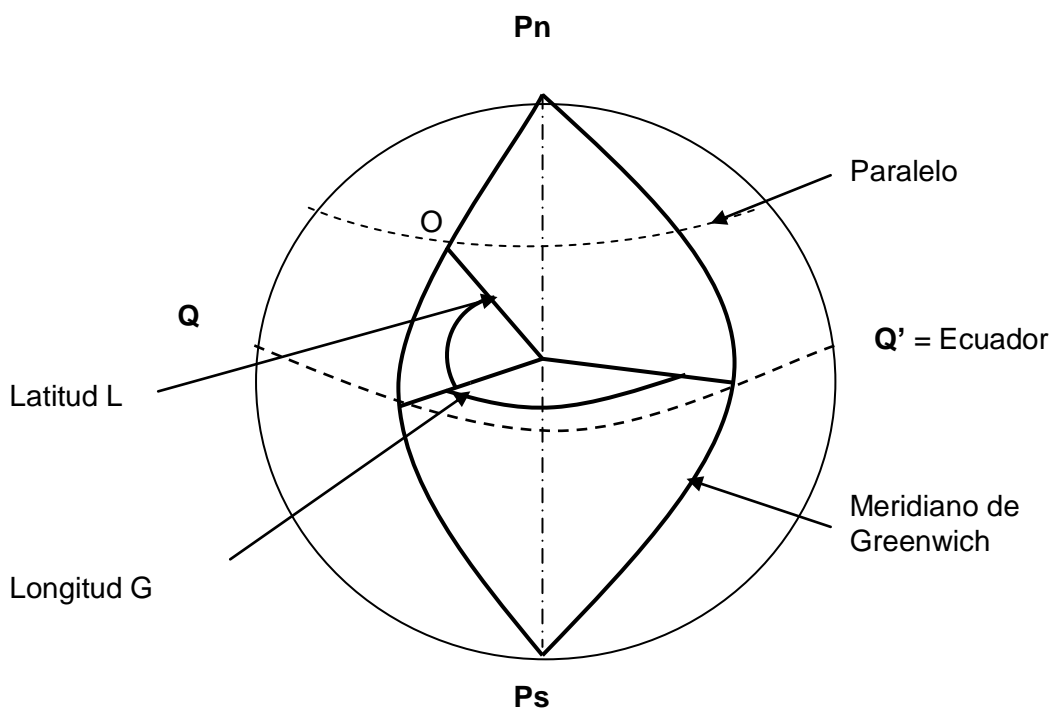


3.- Azimut



Dos observadores "A" y "B", ambos en el círculo de alturas iguales, están a la misma distancia del faro, pero lo ven en una dirección distinta. En otros términos, la brújula o el compás de "A" indica un rumbo distinto al de "B" para llegar al faro. A y B se diferencian en el valor de sus respectivos azimutes (Z). Actualmente, el azimut se mide entre el norte y el objeto, contado en sentido horario.

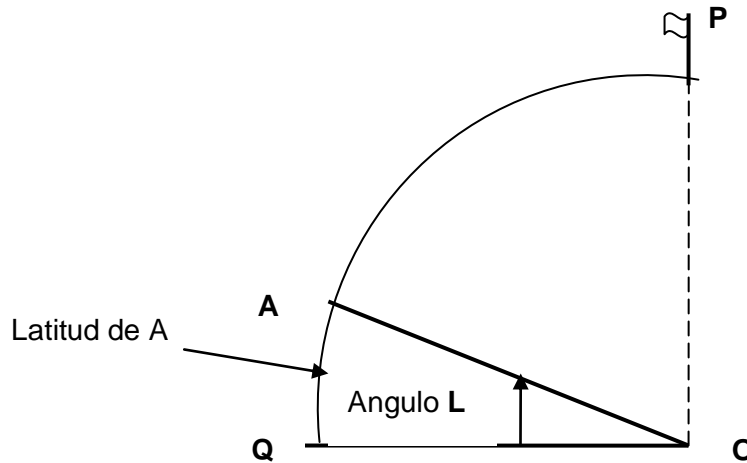
4.- Situación de un punto (O)



En la esfera terrestre una situación viene dada en grados y minutos.



5.- Distancia angular



En una esfera, la distancia angular entre dos puntos (o situaciones), medida sobre un círculo máximo, corresponde al ángulo central expresado en grados y minutos de este arco (no se consideran los segundos en navegación astronómica).

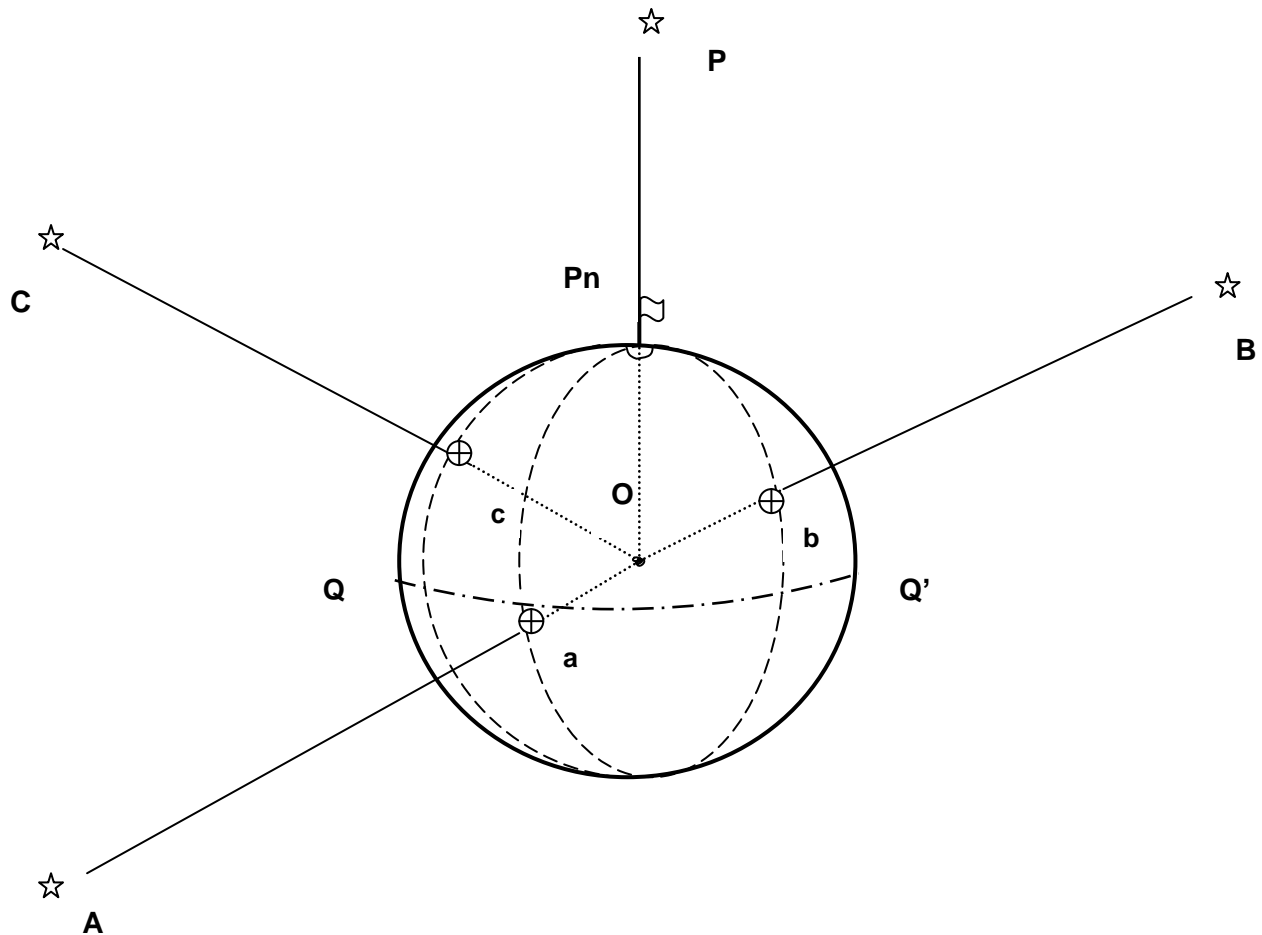
Se llama “círculo máximo” a un círculo que tiene por centro el de la esfera y divide a esta en dos partes (semiesferas) iguales. Por ejemplo :

- Los meridianos (pasando por los polos) son círculos máximos, así como el ecuador.
- Los demás paralelos exceptuando al ecuador no son círculos máximos.

En esta figura, $A = 10^\circ = 600$ Millas, puesto que $1M = 1'$ de arco = 1852 m



6.- Posición geográfica o polo de iluminación, Pg



A cada astro situado en la bóveda celeste corresponde un punto de la superficie terrestre desde el cual un observador vería al tal astro en el cenit.

Llamaremos a este punto “Posición geográfica” (Pg) del astro. En la literatura náutica, también se le llama “polo de iluminación”.

La posición geográfica o polo de iluminación (Pg) es como si dijéramos la base de nuestro faro del comienzo.

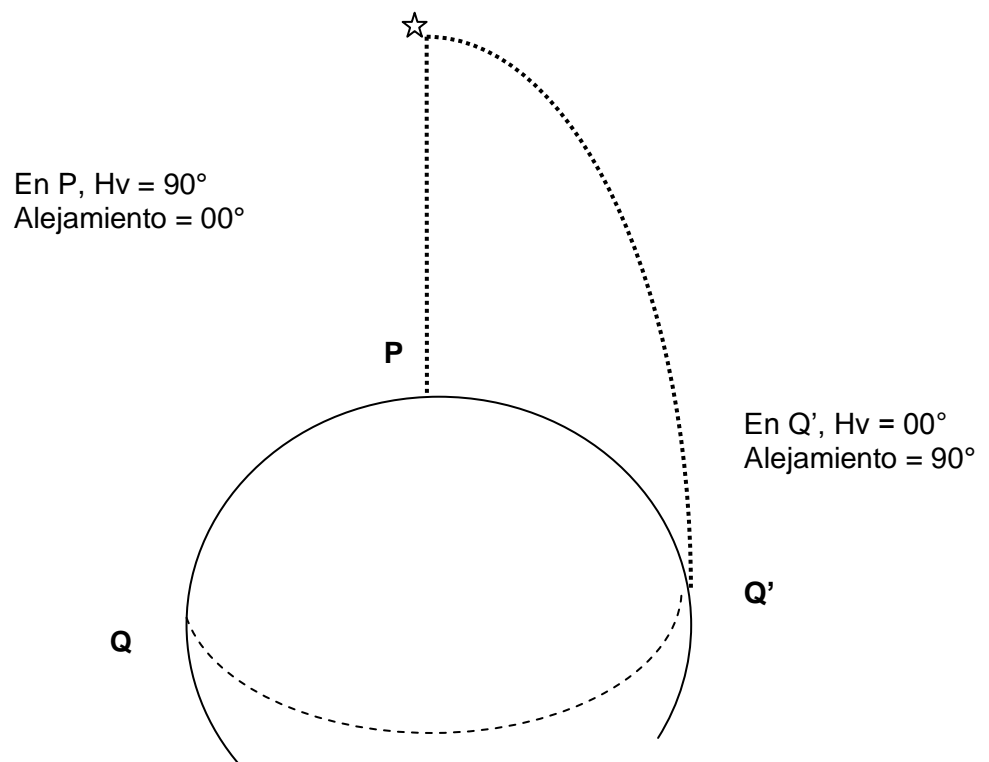


7.- Altura de un astro, H

La altura de un astro sobre el horizonte es inversamente proporcional a la distancia a la posición geográfica de dicho astro.

Cuanto más nos alejamos de la Pg, menor es la altura del astro sobre el horizonte.
Cuanto más nos acercamos a la Pg, mayor es la altura de dicho astro sobre el horizonte.

Ejemplo teórico de la estrella polar :



8.- La hora

La hora UT (Tiempo Universal) es la que corresponde a la hora media del meridiano de Greenwich, que es el meridiano cero para las longitudes. En un momento dado, la hora UT es la misma en todo el mundo.

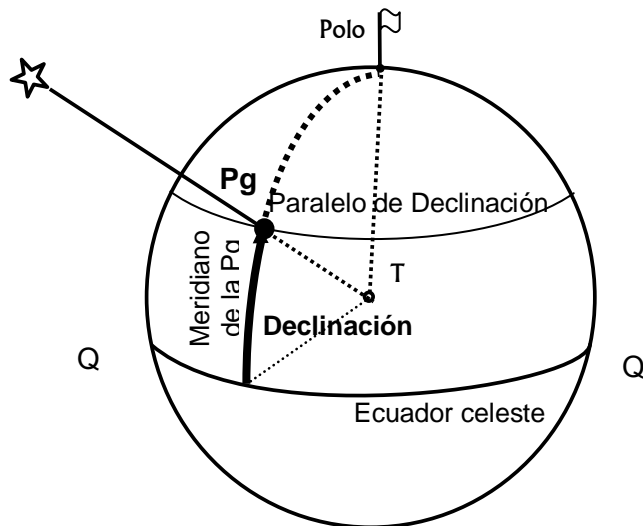
Para que la hora en un punto dado de la Tierra coincida aproximadamente con la hora solar, la superficie de la Tierra ha sido dividida en husos horarios de 15° de anchura ($360^\circ / 24 = 15^\circ$). El huso de Greenwich va de $7^\circ 30' E$ a $7^\circ 30' W$.

Para compensar las irregularidades de la rotación de la Tierra, se añade una o dos veces al año un segundo intercalado.



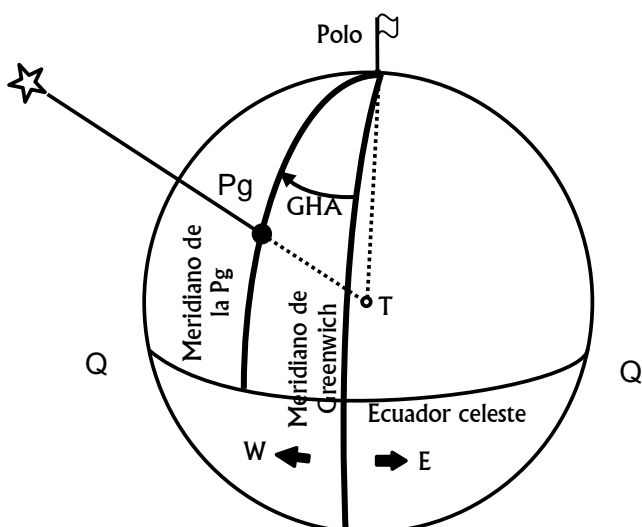
9.- La declinación, Dec

La declinación (Dec) es el ángulo entre el ecuador y la posición geográfica del astro. La declinación varía entre 0° y 90° N o 0° y 90° S. En inglés la abreviación es "D".



10.- El horario en Greenwich (hG o GHA)

El horario en Greenwich (hG) es el ángulo entre el meridiano de origen (Greenwich) y la posición geográfica del astro. Varía entre 0° y 360° en el sentido de las agujas del reloj. En inglés la abreviación es "GHA".





11.- Las efemérides náuticas

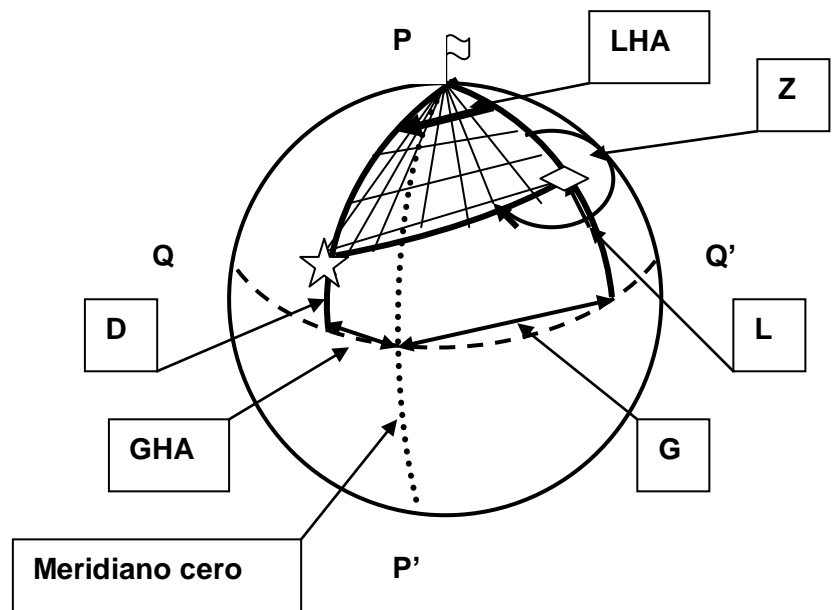
Entre otros elementos, nos facilitan la posición geográfica (Pg) de los astros en cada instante del año.

Para evitar confusiones, estas posiciones no vienen dadas en latitud y longitud sino en declinación y horario en Greenwich.

Por ejemplo : 23 de abril 2.007, sol

15h00	45° 24.5'	N 12° 32.5'	
(GMT)	(GHA)	(D)	(en inglés)
(UT)	(hG)	(Dec)	(en castellano)

12.- El triángulo astronómico



- ◊ = O Observador en latitud "L" y en longitud "G"
- ☆ = Pg Posición geográfica del astro situado en declinación "Dec" y horario "GHA"
- PP' Polos
- QQ' Ecuador
- Zn Azimut del astro, ángulo entre le meridiano del observador y la dirección del astro, como una demora.
- LHA Angulo en el polo (u horario) entre el meridiano del observador y el meridiano de la Pg del astro

El triángulo astronómico (o de posición) es el que une los puntos ◊ y ☆ al polo "P" del hemisferio en el que se halla el observador.



Navegación astronómica
Principios básicos y definiciones

Conocemos muchos elementos de dicho triángulo astronómico y podemos calcular los demás elementos :

- conocidos
 - ángulo en el polo (LHA)
 - latitud (L) o su complemento ($90^\circ - L$)
 - declinación (D) o su complemento ($90^\circ - D$)
- por determinar
 - el lado O-Pg que corresponde a la distancia de la Pg con respecto al observador, es decir $90^\circ - H$
 - el ángulo Z de la dirección del astro, es decir el azimut Z_n

Vea también las láminas al final del documento.

13.- Las fórmulas matemáticas

No es necesario ser matemático para resolver los cálculos astronómicos propios de la navegación.

Pero he aquí algunas fórmulas matemáticas para resolver los triángulos esféricos en dichos cálculos astronómicos :

Teorema de los cósenos :

En un triángulo esférico podemos expresar el coseno de un lado en función de los otros dos lados y el ángulo opuesto con la formula :

$$\text{Cos } a = \text{Cos } b * \text{Cos } c + \text{Sen } b * \text{Sen } c * \text{Cos } A$$

He aquí algunas fórmulas matemáticas para resolver los triángulos esféricos en los cálculos astronómicos :

$$\text{Sen } H_c = (\text{Sen } L * \text{Sen } Dec) + (\text{Cos } L * \text{Cos } D * \text{Cos } LHA)$$

$$\text{Cotg } Z_n = (\text{Sen } L * \text{Cotg } LHA) - \left(\frac{\text{Tang } D * \text{Cos } L}{\text{Sen } LHA} \right)$$

En todos los casos, para obtener el valor de altura del astro (H) y su azimut (Z), necesitamos conocer :

- Valor del ángulo horario (LHA)
- Declinación del astro (D)
- Latitud (L)



Eso significa que hace falta tener dos cosas importantes :

-Las Efemérides

-Un cronómetro

Las tablas de cálculos facilitan la operación que también se puede hacer con logaritmos o una calculadora electrónica.

Parte.
Tabla del verdadero.

Abc. res.	Enero.		Febrero.		Março.		Abril.		Mayo.		Junio.	
Sig. noz.	Capricor.		Aquarius		Piscis.		Aries.		Taurus.		Geminis.	
Die	h	m	h	m	h	m	h	m	h	m	h	m
1	20	22	21	53	20	55	21	24	20	21	19	55
2	21	24	22	54	21	55	22	22	21	18	20	52
3	22	25	23	54	22	54	23	21	22	16	21	49
4	23	26	24	55	23	54	24	19	23	13	22	46
5	24	27	25	55	24	53	25	17	24	11	23	43
6	25	28	26	56	25	53	26	16	25	8	24	40
7	26	30	27	56	26	52	27	14	26	6	25	37
8	27	31	28	56	27	52	28	12	27	3	26	34
9	28	32	29	57	28	51	29	10	28	0	27	31
10	29	33	0	57	29	50	0	8	28	58	28	28
11	0	35	1	57	0	49	1	6	29	55	29	25
12	1	36	2	58	1	48	2	4	0	52	0	22
13	2	37	3	58	2	47	3	2	1	50	1	19
14	3	38	4	58	3	46	4	0	2	47	2	16
15	4	39	5	58	4	45	4	58	3	44	3	13
16	5	40	6	58	5	44	5	56	4	41	4	10
17	6	41	7	58	6	43	6	54	5	38	5	7
18	7	42	8	58	7	42	7	52	6	36	6	4
19	8	43	9	58	8	41	8	49	7	33	7	1
20	9	44	10	58	9	39	9	47	8	30	7	58
21	10	45	11	58	10	38	10	45	9	27	8	55
22	11	46	12	58	11	37	11	43	10	24	9	52
23	12	47	13	57	12	36	12	40	11	21	10	49
24	13	48	14	57	13	34	13	38	12	18	11	46
25	14	48	15	57	14	33	14	36	13	15	12	43
26	15	49	16	56	15	32	15	33	14	12	13	40
27	16	50	17	56	16	30	16	31	15	10	14	37
28	17	51	18	56	17	29	17	28	16	7	15	34
29	18	51	19	56	18	28	18	26	17	4	16	31
30	19	52			19	27	19	23	18	1	17	29
31	20	52			20	25			18	58		

Efemérides siglo XVI

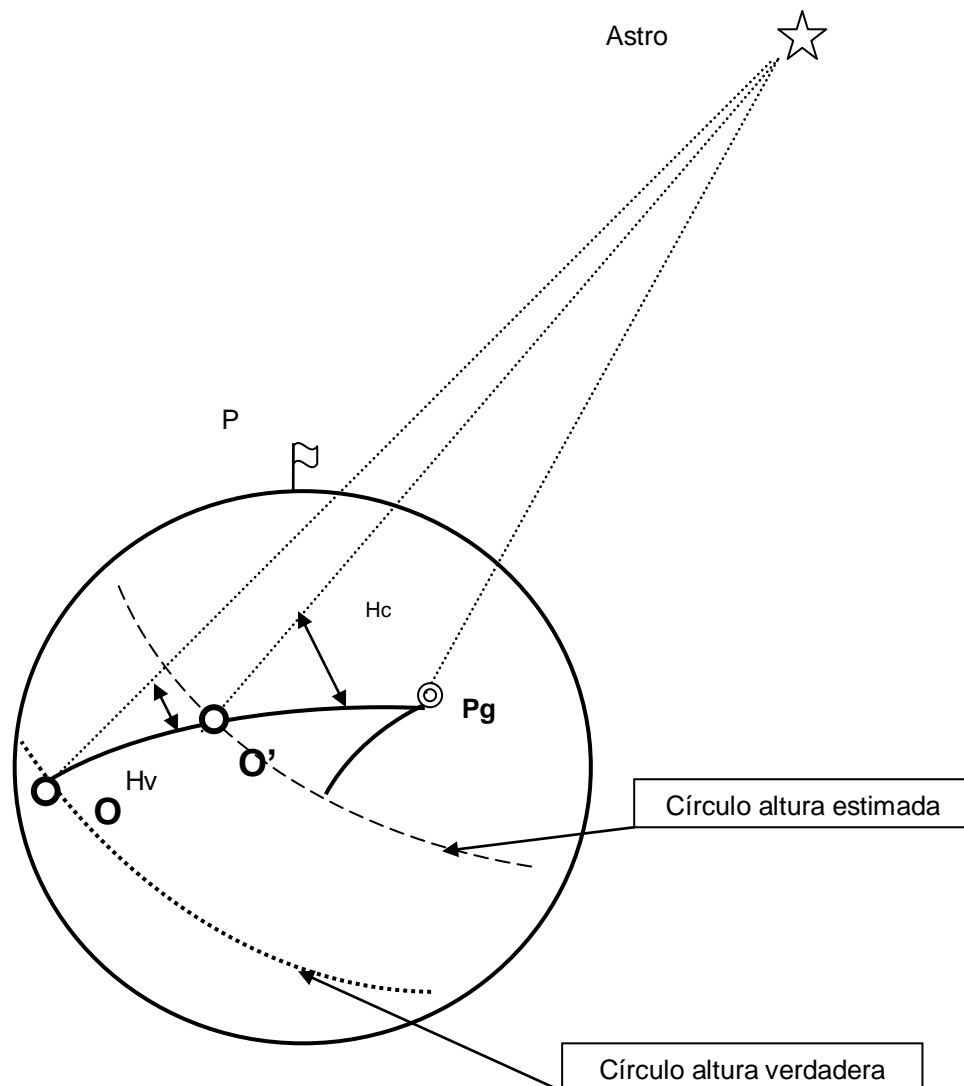


14.- La teoría de Marq Saint-Hilaire

En un momento dado y una posición concreta, es posible calcular con toda exactitud tanto la altura como el azimut de un astro, basándose en los datos de las efemérides.

Comparando los cálculos efectuados para una posición supuesta o auxiliar (P_a), podemos determinar el "error" y rectificar esta situación supuesta. Más concretamente, la comparación entre el cálculo y la observación (con el sextante) nos indica si estamos más o menos cerca de la posición geográfica P_g del astro y el azimut nos da la dirección de dicha P_g .

La diferencia de azimut entre la situación supuesta y la situación real es insignificante. Dos observadores situados en posiciones distintas, incluso a 60 millas, verán el astro en un azimut casi igual. El círculo de alturas iguales es tan grande que la diferencia es prácticamente despreciable. Por ejemplo, tenemos el mismo azimut del sol en Bilbao y en Santander.



O = Observador

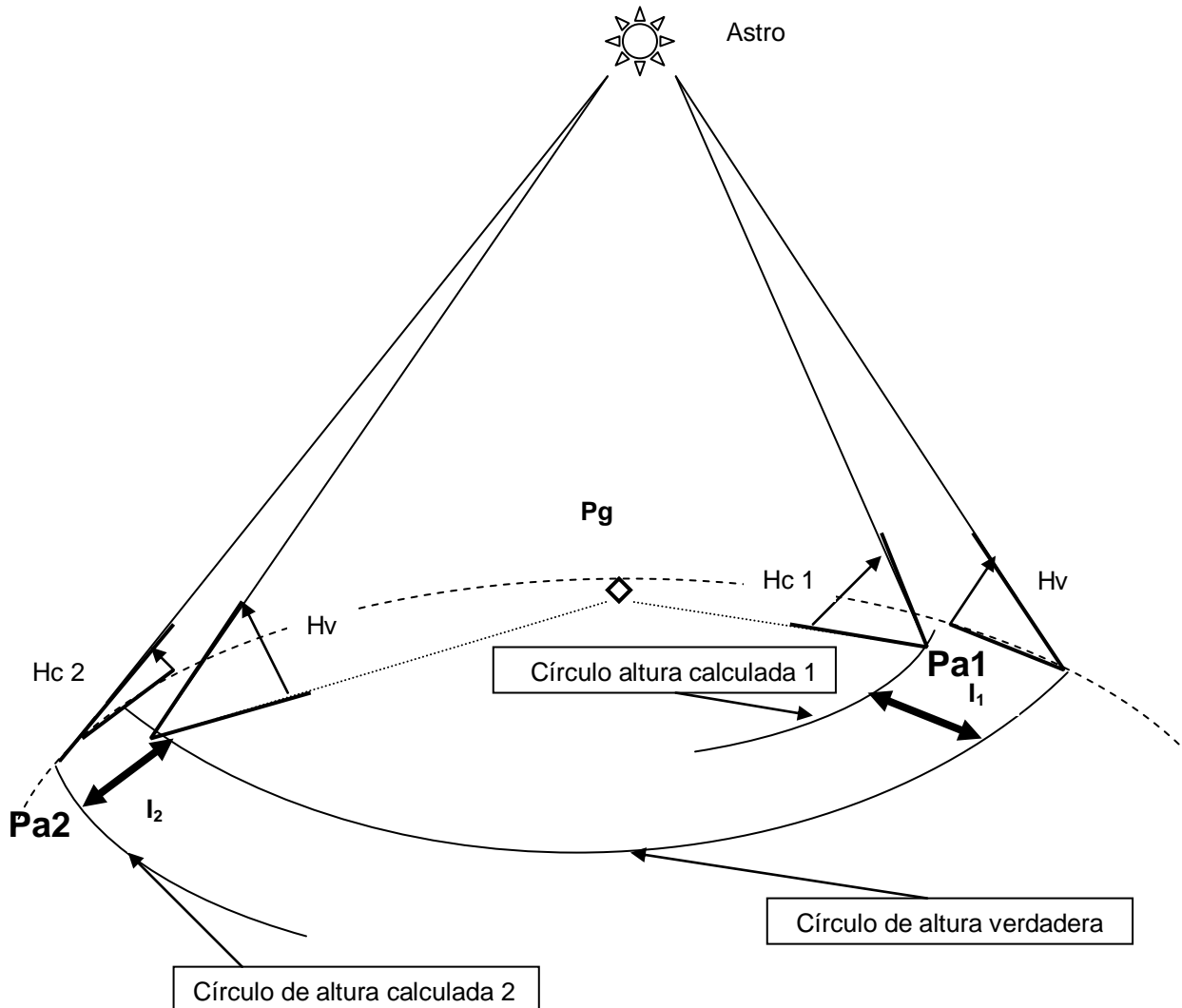
O' = Observador estimado



En la esfera terrestre :

Ahora nos toca comparar el resultado calculado para un observador en Pa con la observación. Con el método de Saint-Hilaire hemos visto que :

- Si, según las tablas, la altura verdadera (Hv) es mayor que la altura calculada (Hc), nuestra recta de altura se encuentra más cerca de la posición geográfica del astro (Pg) y cada minuto de diferencia entre Hv y Hc corresponde a una milla en el mar.
- Si la altura verdadera (Hv, medida con el sextante) es menor que la altura calculada con las tablas (Hc), nuestra recta de altura se encuentra más afuera de la posición geográfica del astro (Pg) y cada minuto de diferencia entre Hv y Hc corresponde a una milla en el mar.



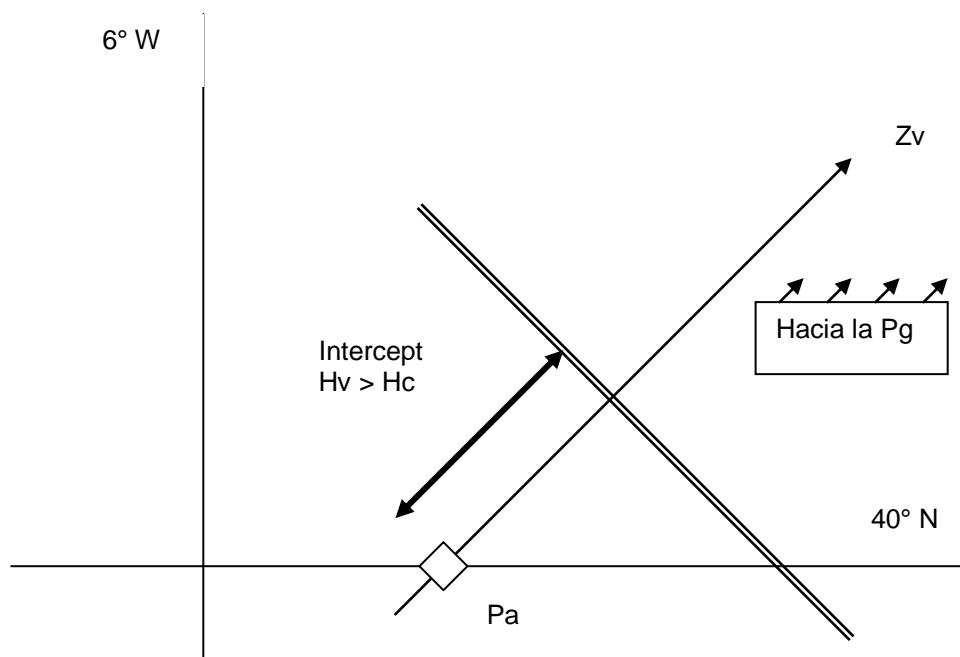
$Hv > Hc$

$Hv < Hc$



En el mapa

Marq Saint-Hilaire sustituyó una pequeña porción del círculo de alturas por una recta tangente al mismo.



Así, la recta de altura es una pequeña parte del círculo de alturas iguales.

Dicha recta siempre es perpendicular al azimut.

El centro del círculo es la Pg del astro.

La diferencia de azimut en una porción de círculo tan pequeña es despreciable y podemos admitir que el azimut en la Pa es el mismo que en la posición del observador.

Una única recta de altura, como una sola marcación, no nos dan una situación, sino una sencilla línea de posición. Para obtener una situación concreta, necesitaremos dos o más rectas de altura.



El Sol

1.- El astro

Esta estrella es el astro más utilizado para la navegación astronómica. La Tierra da la vuelta al Sol en poco más de 365 días. En un año el Sol parece desplazarse atravesando las constelaciones del zodiaco siguiendo una trayectoria llamada “eclíptica”.

La palabra “año” viene del latín “annulus”, el anillo. El año es el intervalo de tiempo que nos trae las estaciones y es una noción conocida desde la prehistoria. Inicialmente, los egipcios no concedían más que 360 días al año. Este concepto pasa a 365 días 4.000 años a. C.

El tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del Sol por el equinoccio de primavera, el año trópico, representa 365,2422 días.

También está el año sideral de 365,25636 días, pero para la navegación astronómica nos contentaremos con esta perspectiva sencilla.

La órbita descrita por la tierra es elíptica. Se sitúa entre 150.000.000 Km. (afelio o apogeo, el 4 de julio) y 147.000.000 Km. (perihelio o perigeo, el 3 de enero). Por ello vemos el diámetro del Sol más pequeño en verano que en invierno, la media siendo de 32' de ángulo.

Desde la Antigüedad se ha usado el Sol para determinar la latitud, incluso sin cronómetro.

Si disponemos de la hora TU, la observación del Sol nos permite calcular rectas de altura que nos situarán igualmente en longitud. Procedamos por orden de sencillez.

2.- La meridiana

El cálculo de la latitud por medio de la observación de la altura meridiana del sol es muy sencillo y rápido. El Sol es prácticamente el único astro que se utiliza para este tipo de observación porque es visible al mismo tiempo que el horizonte. Es el método más antiguo de situarse en latitud, utilizado desde hace ya numerosos siglos.

En el momento del paso por el meridiano de un astro, el azimut de este último es de 000° o de 180°, ya que en ese instante el observador y el astro se hallan sobre el mismo meridiano.

Además en el momento de la meridiana el Sol esta en su punto el mas alto, es decir la culminación.

Aunque desde el punto de vista astronómico haya una diferencia entre el “paso por el meridiano” y la “culminación” del Sol, el navegante puede admitir que ambos acontecimientos se confundan. Por tanto, aceptaremos que la altura meridiana del Sol es la altura de este astro sobre el horizonte en el momento en que más alto está, es decir en su culminación. El conocimiento exacto de la hora no es indispensable para el cálculo puesto que sólo se utiliza la declinación.

Si tomamos alturas iguales del Sol antes y después de su paso por el meridiano, la culminación se halla prácticamente en el medio, tanto por lo que se refiere al tiempo como tratándose del trayecto efectuado por el astro.



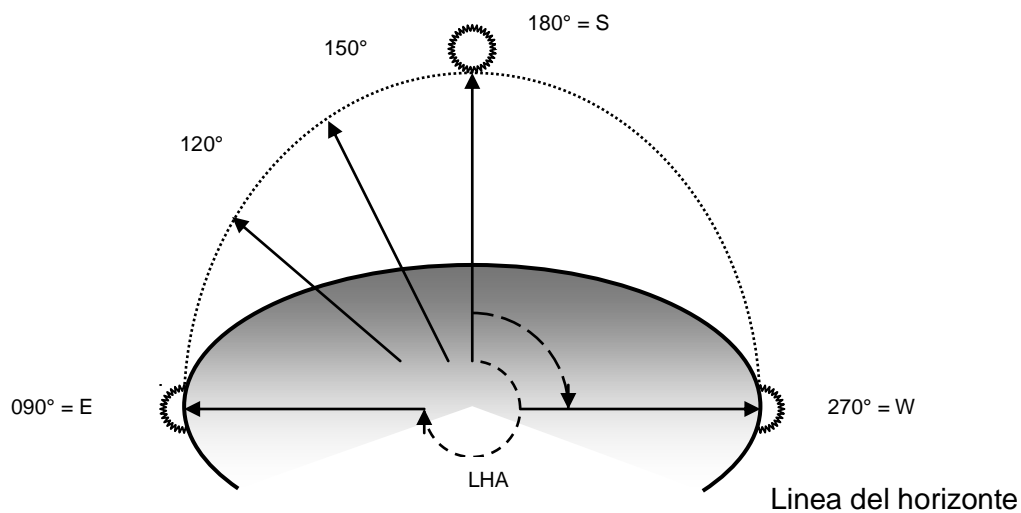
Navegación astronómica

El Sol

En el momento de la meridiana, el horario local (LHA) del Sol es exactamente de 000° o de 360° . Entre el orto y la meridiana de este mismo astro, el valor del horario local LHA es “grande” entre $\sim 270^\circ$ y 360° , mientras que después de la meridiana el valor del LHA es “pequeño”, es decir entre 000° y $\sim 90^\circ$.

Por fin se nota que la formula matemática para resolver el triangulo astronómico se convierte por el caso de la meridiana en una sencilla adicción algébrica.

El esquema siguiente ilustra este concepto de la meridiana.



Hemisferio norte, época del equinoccio

Zv entre 090° y 180°

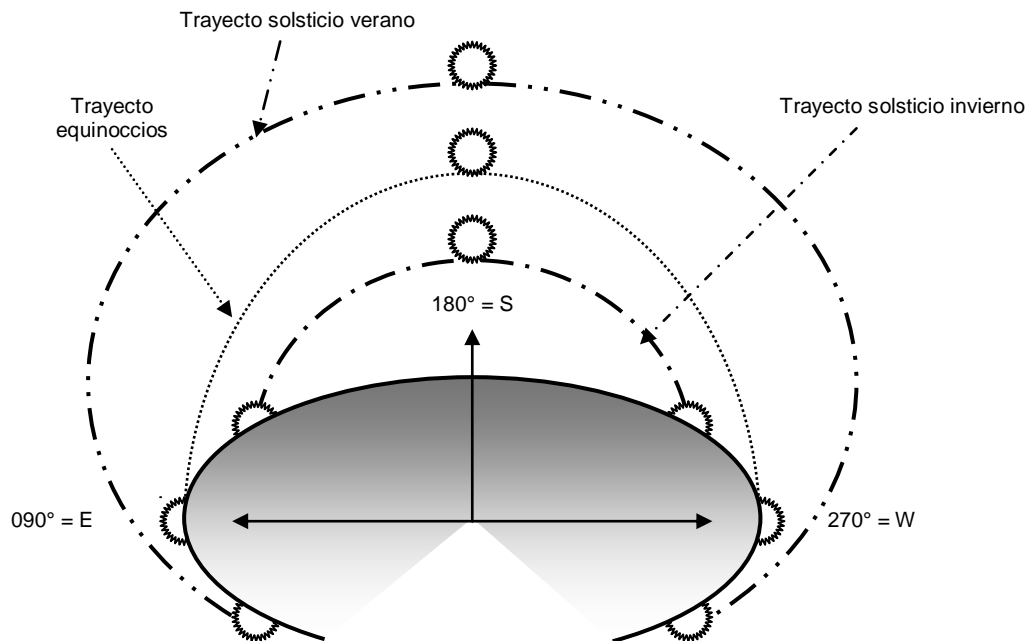
LHA entre 270° y 360°

Zv entre 180° y 270°

LHA entre 000° y 090°



Concepto de la meridiana, hemisferio norte :



La formula matemática que se utiliza es :

Culminación mirando al Norte : $L = D - Dz$

Culminación mirando al Sur : $L = D + Dz$

Declinaciones y latitudes son positivas si son Norte y negativas si son Sur.



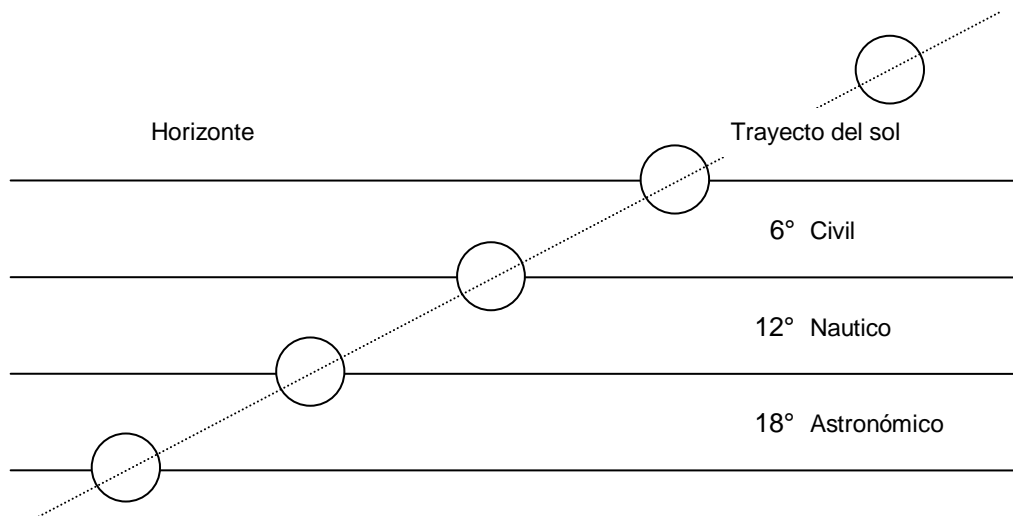
Las estrellas

La gran ventaja de las estrellas es que podemos tomar diversas medidas de altura prácticamente al mismo tiempo. Así evitamos todos los problemas referentes al traslado de las rectas de altura.

Hay que tomar las alturas con el sextante cuando las estrellas utilizadas son visibles y que el horizonte lo sea igualmente. Esto significa que se pueden tomar medidas entre el principio del alba y la salida del sol, o entre su puesta y el final del crepúsculo.

De noche, no hay que utilizar el horizonte iluminado por la luna, porque la luz de ésta última falsea las medidas.

En astronomía, distinguimos el crepúsculo civil (sol a 6° bajo el horizonte), el crepúsculo náutico (sol a 12° bajo el horizonte), y por último el crepúsculo astronómico (sol a 18° bajo el horizonte, es decir noche cerrada). Es evidente que si el sol sale o se pone “verticalmente”, como en los trópicos, la disminución de la luminosidad es rápida (o su aumento). En cambio en las latitudes más elevadas, el trayecto del sol es cada vez más oblicuo y el alba o el crepúsculo son más largos, incluso muy largos cerca de los polos, pudiendo llegar hasta un período de 24 horas.



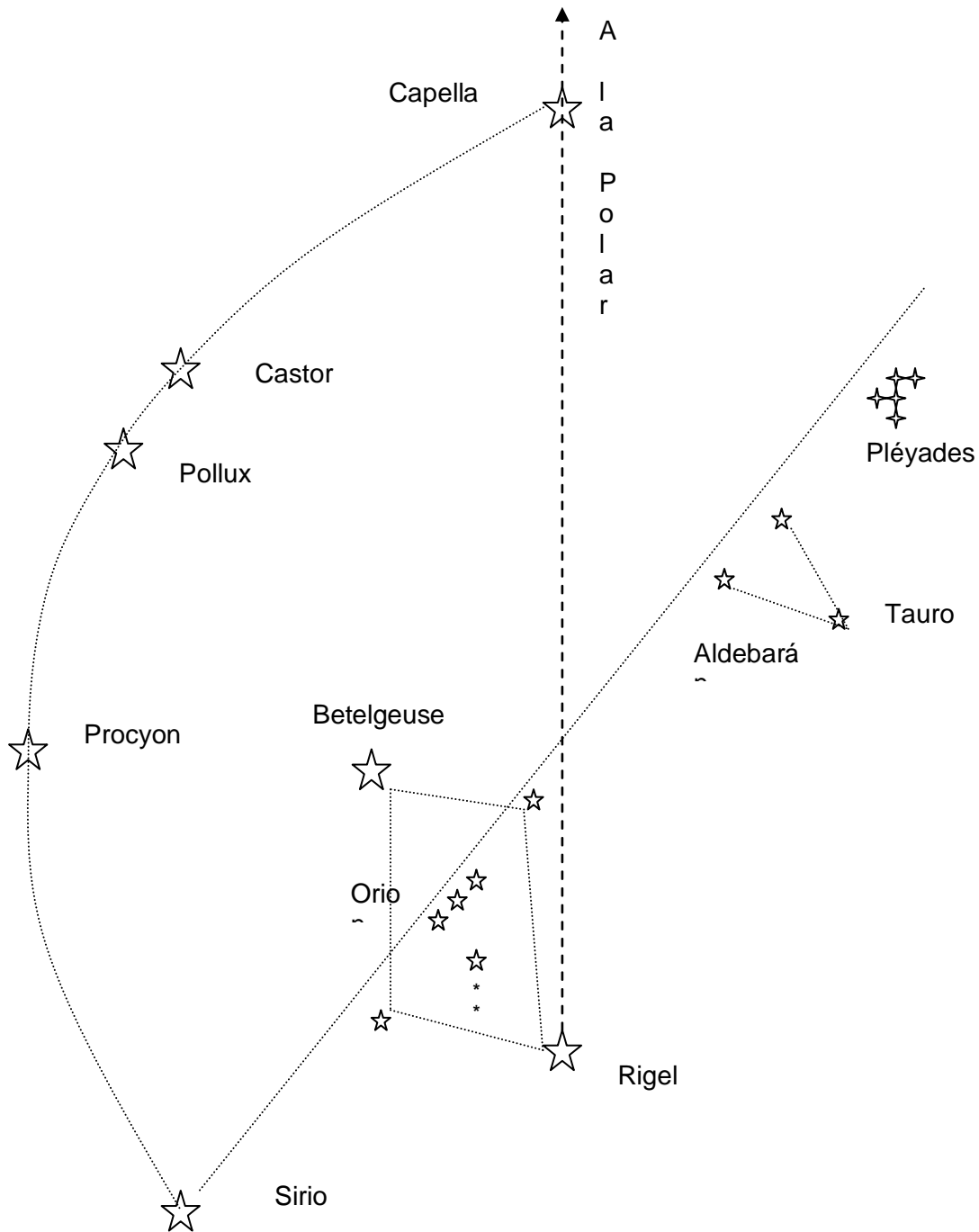
A pesar de que las estrellas se desplazan las unas con respecto a las otras a velocidades vertiginosas, la imagen de la bóveda celeste puede considerarse como constante durante todo el año. Es como decir que el horario en Greenwich (GHA) y la declinación de las estrellas permanecen constantes entre el primero y el último día del año. También es como decir que no se desplazan las unas con respecto a las otras. Por ello, si conocemos la Posición geográfica (Pg) de una estrella o de un punto de la bóveda, somos capaces de hallar la Pg de todas las demás estrellas que se utilizan para la navegación astronómica.



Navegación astronómica

Las estrellas

Utilizaremos como punto de referencia (o como cero) el Punto Vernal (o primer punto de Aries), es decir el punto del infinito determinado por la dirección Tierra-Sol en el instante del equinoccio de primavera, el instante en el que la declinación del Sol pasa de sur a norte y por lo tanto vale cero.



Constelación de Orión, joya de los cielos de invierno



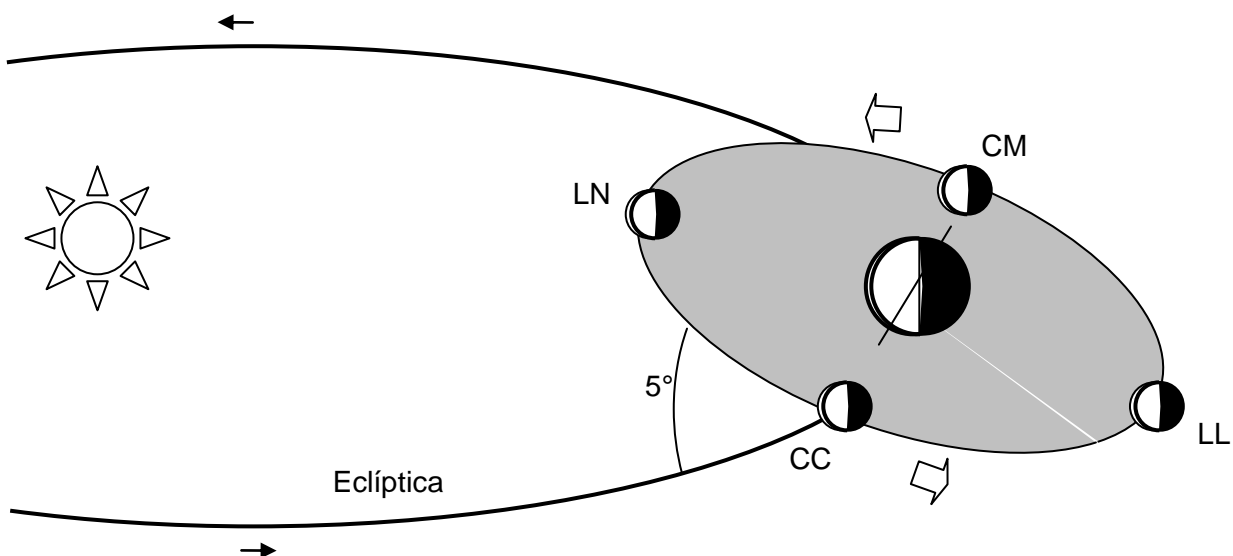
La Luna

1.- El astro

Unas palabras sobre Doña Luna. Tiene un diámetro de 3476 Km. (cerca de la cuarta parte del de nuestro planeta) y gira alrededor de la Tierra siguiendo una órbita elíptica de 356.000 Km. en su perigeo y 406.000 en su apogeo.

El plano de esta órbita lunar forma con el de la Tierra un ángulo de 5° aproximadamente. El paso de nuestro satélite por el plano de la órbita terrestre se llama **nodo** (ascendente o descendente), un concepto muy utilizado por ejemplo en agricultura.

La luna tarda 27 días, 7 horas, 43 minutos y 12 segundos en efectuar su rotación alrededor de la Tierra, lo que se denomina su **período sidéreo**. Para el observador terrestre, la Luna habrá recorrido en su camino todas las constelaciones zodiacales. Cada día sale unos 50 minutos más tarde, modificando otro tanto las horas de las mareas, como saben los marinos.



Eclíptica y plan orbital de la luna

LN = Luna Nueva
CC = Cuarto Creciente
LL = Luna Llena
CM = Cuarto Menguante

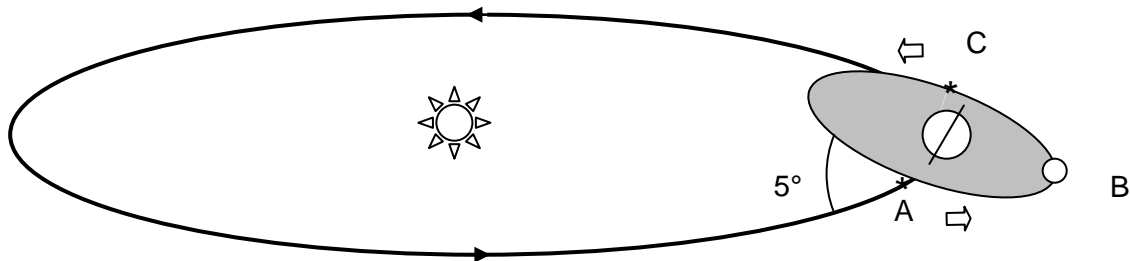
La combinación del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y del camino recorrido por nuestro planeta por su órbita alrededor del Sol hace que el tiempo necesario para que los tres astros se encuentren en la misma fase (por ejemplo luna llena) es de 29 días, 12 horas, 44 minutos y 3 segundos, lo que se denomina **período sinódico** (o mes lunar) de la Luna.



Navegación astronómica

La Luna

El período sinódico (también llamado la lunación) es pues dos días superior al período sideral. Es aquel período el que se utiliza en los calendarios lunares practicados por numerosas civilizaciones.



Eclíptica y conjunción
Eclipse de luna

A = nodo descendente

B = luna llena

C = nodo ascendente

Cuando las posiciones relativas de los tres astros están cercanas, la Luna nos muestra su cara oscura y por lo tanto no la vemos. El período llamado **luna nueva** dura aproximadamente 4 días, dos antes y dos después de la luna nueva teórica.

Cuando nuestro satélite se separa del Sol con un ángulo suficiente (hacia el este para nosotros), se ve aparecer un estrecho gajo de Luna. Es la fase creciente de la Luna.

Después de una semana nos hallamos en la fase llamada **cuarto creciente**. La Luna es visible durante la tarde y al principio de la noche, saliendo cada día algo más tarde como hemos visto.

Una semana más y estamos en fase de **luna llena**, el astro nos acompaña toda la noche.

Luego viene la fase decreciente de la Luna, y siete días más tarde estamos en **cuarto menguante**. La Luna sale por el este hacia media noche y sigue visible durante la mañana.

Para el navegante esto significa que nuestro satélite es visible al mismo tiempo que el sol durante prácticamente 14 días al mes. Sería un error no utilizar esta posibilidad de determinar nuestra posición en navegación astronómica con un par de rectas de altura simultáneas de estos dos astros.



Navegación astronómica

La Luna

La Luna gira sobre sí misma con un período de rotación que corresponde exactamente a su período de traslación alrededor de la Tierra. Por ello, nos presenta siempre la misma cara, lo cual no es una casualidad.

En efecto, hay una interacción entre los dos astros, atribuible a la importante fuerza gravitacional de la Tierra.

Cuando el Sol, la Tierra y la Luna se reúnen sobre un mismo eje, se habla de enfilamiento, incluso de conjunción. Si el plano de la órbita de la Luna no tuviera una inclinación de unos 5° con respecto al de la eclíptica, habría forzosamente una conjunción cada 14 días, una vez en Luna nueva y la siguiente en Luna llena.

En realidad, esta situación no se presenta más que cada seis meses aproximadamente y así fue la noche del 3 de marzo de 2007, cuando pudimos observar un eclipse total de Luna poco antes de medianoche. ¡Suponemos que las mareas fueron muy vivas!

Hemos visto que para que haya **eclipse** hace falta que el Sol, la Tierra y la Luna se hallen prácticamente en un mismo enfilamiento, por lo tanto un eclipse no puede tener lugar más que con luna nueva o llena.

Durante un **eclipse de sol**, la sombra de la Luna (nueva) se proyecta sobre la superficie de la Tierra. Dicho eclipse puede ser total o parcial.

Sobre la Tierra, la banda de visibilidad de un eclipse total de Sol no excede algunos centenares de kilómetros. Por lo tanto, no es visible desde todas partes.

El **eclipse de luna** es debido al paso de nuestro satélite por el cono de sombra de la Tierra. Al ser el diámetro de nuestro planeta mayor que el de la Luna, el cono de sombra producido por la Tierra es suficientemente grande para oscurecer la totalidad de la superficie de la Luna y el fenómeno es visible desde todas nuestras latitudes.

El fenómeno dura alrededor de 200 minutos, de los cuales 60 son de oscurecimiento total. Por ejemplo, en el eclipse del 3 de marzo 2007, fue entre 22 :45 y 23 :55 UT.

Vemos que globalmente los movimientos de los astros implicados son bastante complejos. De hecho, hay que esperar **casi 19 años** (teóricamente 6.939 días y pico) para volver a tener un cielo en el que los astros en cuestión ocupen posiciones relativas prácticamente idénticas.

Los antiguos no ignoraban estos conocimientos del tiempo, incluso en el Neolítico. Monumentos astronómicos como Stonehenge y tantos otros sobre el planeta lo han demostrado. Por otra parte, hace apenas unos siglos los cálculos de mareas aún estaban basados en este ciclo.

¿Acaso significa esto que las efemérides y tablas de mareas de 1994 serían utilizables en 2012? Desgraciadamente no es así debido a la exactitud que exige la navegación.

En efecto, la duración del ciclo no es un número entero (en realidad 6939,6882 días), y no hay que dejar de lado los fenómenos de precesión, nutación y libración lunares, ni la disminución de la velocidad de revolución de la Tierra sobre su eje.



Navegación astronómica

La Luna

Sobre la base de los elementos que se conocen actualmente, se puede admitir que finalmente la repetición exacta de la imagen solo se produce una vez cada 70.499.183 lunaciones, es decir cada 5.700.000 de años...

Se llama **Epacta** el número de días que hay que añadir al año lunar para que sea igual al año solar. Este concepto formaba parte de los conocimientos que necesitaban los navegantes para la navegación astronómica y para predecir las mareas.

En vista de las indicaciones mencionadas, se comprende que la epacta es una cifra que cambia cada año.

Puede ser interesante ver los diferentes valores para estos próximos años:

2008	21 días	2013	18 días	2018	13 días	2023	08 días
2009	04 días	2014	28 días	2019	24 días	2024	19 días
2010	15 días	2015	09 días	2020	06 días	2025	02 días
2011	26 días	2016	20 días	2021	17 días	2026	11 días
2012	18 días	2017	03 días	2022	27 días	2027	21 días

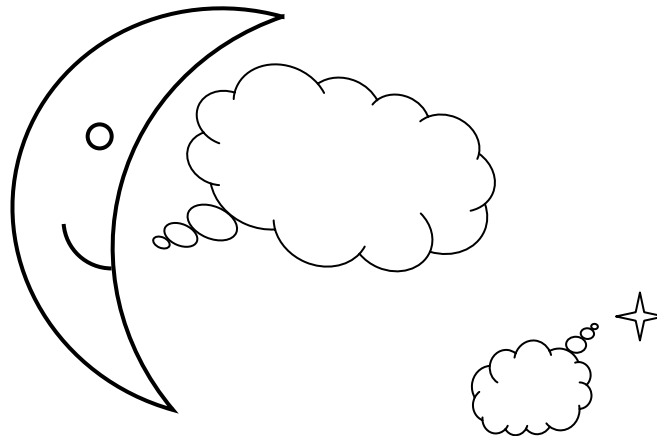
Así, añadiendo la duración del mes lunar (período sinódico de 29 días, 12 horas, 44 minutos, 3 segundos) se puede obtener un calendario lunar para el año que nos interese.

Ejemplo para 2010 :

La epacta siendo de 15 días, la luna nueva anterior será el 16 de diciembre 2009 (31 de diciembre – 15 días).

La primera luna llena tendrá lugar 14 días más tarde (16 de diciembre + 14 días = 30 de diciembre 2009).

La luna nueva de enero 2010 se producirá el 15 de enero (16 de diciembre + 29 ½ días redondeados).





Las Planetas

1.- Generalidades

Los planetas son astros que gravitan, como la Tierra, alrededor de la misma estrella, el Sol.

Estos astros no centellean, excepto en circunstancias atmosféricas excepcionales. Los planetas se desplazan sobre la esfera celeste y siempre se ven en la zona de la eclíptica, pasando de una constelación zodiacal a otra.

Se distinguen los planetas llamados interiores y los planetas exteriores. Los primeros tienen una órbita interior a la de la Tierra, son Venus y Mercurio.

De los planetas exteriores, sólo se usan para la navegación astronómica Júpiter y Saturno, al ser los demás poco visibles o invisibles por el anteojo de un sextante.

La magnitud (brillo) de Venus y de Júpiter es importante, por lo cual son los dos planetas que más se utilizan para la navegación astronómica.

Venus tiene un resplandor más brillante que el de las estrellas más luminosas. Marte, con su color rojizo, es fácil de identificar y viene en tercera posición.

Venus es un planeta interior. Por ello, sale o se pone poco antes o poco después del Sol. Venus avanza o retrocede según la estación del año. Por ello aparece durante 10 meses como astro matutino, y después es inobservable durante 3 o 4 meses antes de convertirse durante otros 10 meses en astro vespertino. También se le llama "lucero del alba" o "lucero vespertino".



Venus



Marte



Júpiter



Saturno



Evolución de los instrumentos de medida

1.- Generalidades

Hemos visto que para obtener la situación tenemos que hallar nuestra latitud y nuestra longitud. La primera es bastante fácil de determinar, incluso con instrumentos simples. No es el caso de la longitud, que necesita una relación con el meridiano de origen.

En 1600, el rey de España Felipe III^o fue el primero en ofrecer una recompensa al que hallara una solución práctica al problema de la determinación de la longitud en la mar. Le siguieron Holanda, Francia y sobre todo Inglaterra, que en 1714 ofreció una recompensa de 20.000 libras, (es decir más de un millón de dólares USA actuales) a quien encontrara un método que permitiera calcular la longitud con una aproximación de 30 millas.

En su obra titulada “Astronomía”, LA LANDE escribía en 1771 que era de primera importancia poder hallar, en alta mar, el grado de longitud en el que uno se encuentra. Continuaba, recordando que no es difícil saber la hora que es en un barco observando la altura de un astro. Para LA LANDE, el problema se reduce por tanto a saber en todo momento qué hora es en el meridiano de origen, es decir en París para este astrónomo francés.

La obra española sobre náutica es inmensa. Libros, regimientos y tablas son de uso imprescindible en la mar. Maestros como Pedro de Medina, Martín Cortés y muchos otros han editado gran cantidad de libros que se han traducido a varios idiomas entre los siglos XV y XVII en particular. Con este motivo, el director del Museo Naval de Madrid, Julio F. Guillén y Tato decía muy a propósito que Europa aprendió a navegar en libros españoles.

Los instrumentos capaces de medir el tiempo y de dar la hora han marcado a la Humanidad desde tiempos inmemoriales. En este capítulo vamos a mencionar algunos de estos instrumentos, pero el tema es muy amplio, así como la literatura al respecto. Proponemos al lector que consulte algunos títulos que mencionamos más abajo.

2.- Los instrumentos de medida del tiempo

2.1 El gnomon

Esta palabra deriva del griego y significa “el indicador”. Simple palo hincado en el suelo, este instrumento puede servir para medir la hora, pero también la latitud en un lugar.

Introducido en la antigua Grecia por Anaximandro, este instrumento babilónico era conocido desde el siglo XXIV a. C. por los chinos, que ya lo usaban en la época de Yao.



La sombra del palo es infinita a la salida del sol, después disminuye de hora en hora hasta su dimensión mínima al pasar el astro por el meridiano, y luego continúa su camino en sentido inverso en el transcurso de la tarde. Así se obtiene la hora solar.

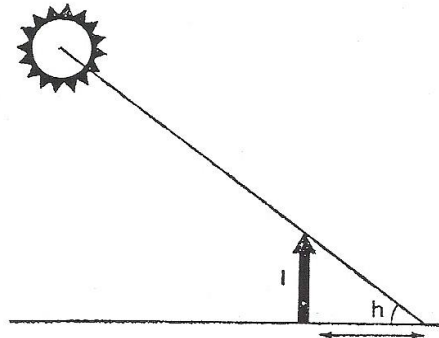


Fig. 1

El largo de la sombra varía también según las estaciones. Una observación del extremo de la sombra del gnomon muestra que en los equinoccios describe una recta, al estar la trayectoria del sol exactamente sobre el eje este-oeste. En los demás períodos del año, esta sombra describe una curva (hipérbola) que se acentúa hasta un máximo en el momento del solsticio.

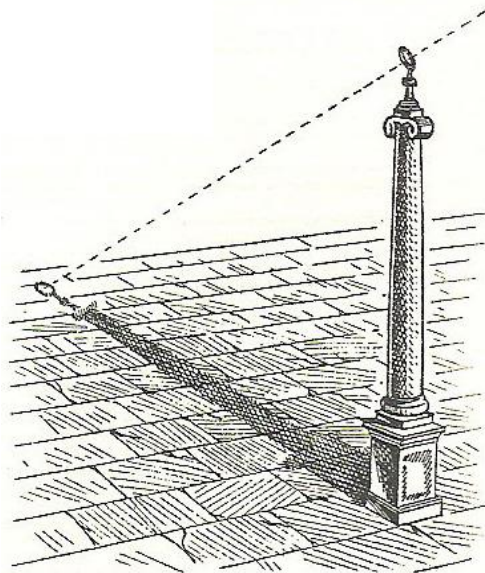


Fig. 2

Por último, este instrumento permite también medir la latitud de un lugar, como lo describe el arquitecto romano VITRUVIO y como ya lo había escrito Claudio PTOLOMEO en el II° siglo de nuestra era en su obra “El Almagesto”, en la que llega a publicar una “tabla de las sombras” que permite hallar la latitud de un lugar.



2.1.1 Base teórica

A simple vista, se observa que el camino seguido por la sombra de la punta de un gnomon es una recta en los equinoccios (Declinación = cero), pero describe una hipérbola inclinada al sur en el solsticio de invierno (Declinación = máxima sur) y una hipérbola inclinada al norte en el solsticio de verano (Declinación = máxima norte). Hay que tomar en cuenta que la sombra más corta es la del instante de la culminación, y que podemos obtener la latitud con la simple fórmula :

- Latitud = Distancia cenital + Declinación (el las latitudes tropicales se utiliza otra formula)
- o,
- Latitud = $(90^\circ - \text{altura}) + \text{Declinación}$ (N = +, S = -)

También tenemos: $\text{Tangente altura del Sol} = \text{altura del gnomon} / \text{medida de la sombra}$

Los antiguos indicaban la latitud de un lugar por medio de la simple relación matemática “gnomon / sombra” en el momento del equinoccio (Declinación = cero). Por ejemplo, Vitrubio indicaba la latitud de Roma, en su obra escrita en el siglo I a. C., como una relación de la sombra equinoccial de 8/9, lo que hoy día se traduciría por $41^\circ 38'$.

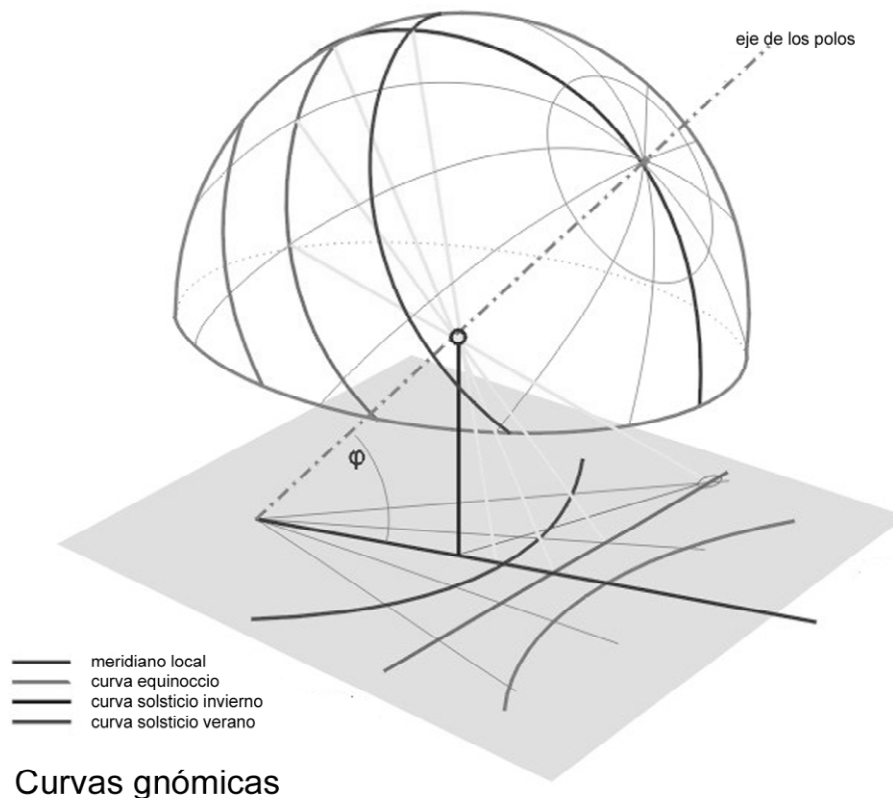


Fig. 3



2.1.2 La brújula solar de los vikingos

Un descubrimiento hecho en Groenlandia, en el fiordo de Unartoq, demuestra que los vikingos estaban tan avanzados en el arte de navegar como las poblaciones del litoral mediterráneo.

Entre varios objetos vikingos descubiertos en la Isla Verde, se encuentra un disco de madera que ha resultado ser una auténtica brújula solar.

Las investigaciones han demostrado que las muescas que marcan el borde del disco son una forma de rosa de los vientos, las líneas transversales grabadas en la madera de esta reliquia son en realidad líneas gnómicas que representan el trayecto de la sombra de un pequeño gnomon a lo largo del día.

Así, basta con colocar a esta sombra sobre la línea gnómica para que el navegante halle una indicación del norte verdadero (de hecho, el meridiano del lugar), lo cual le permite determinar el rumbo que sigue el navegante.

Es evidente que la línea gnómica viene definida por la latitud del lugar y por la Declinación (por lo tanto por el momento del año en el que se navega). Por ello, este tipo de compás solar sólo era exacto en una latitud y un período concretos. Han sido realizadas pruebas en los dos hemisferios por navegantes avezados, como Sir Robin Knox Johnson. Ha resultado que para un período de varias semanas, la precisión del instrumento es más que suficiente, siempre que no haya un cambio de latitud demasiado importante.

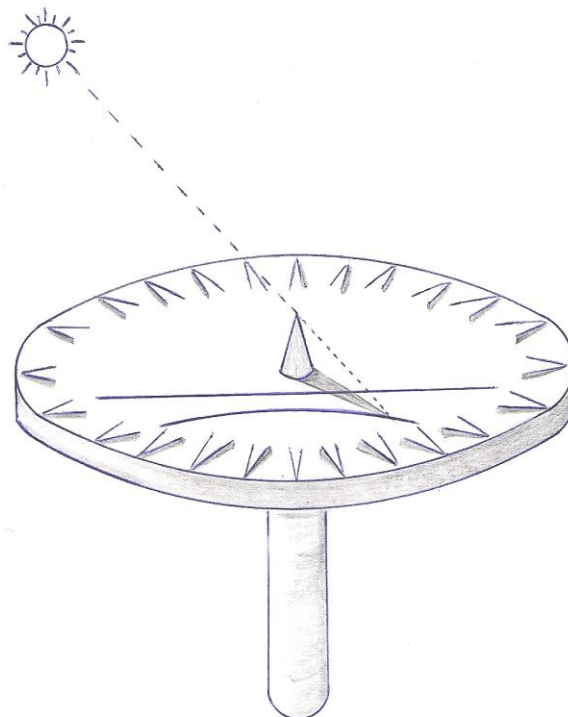


Fig. 4



2.2 El reloj de sol

Este instrumento da la hora gracias a la sombra de un objeto, llamado a menudo índice o gnomon.

Hay muchos tipos de relojes de sol, verticales, horizontales, cilíndricos, ecuatoriales, polares, portátiles o fijos.

Todos necesitan una corrección en relación con la ecuación del tiempo. El valor de esta corrección viene indicada a menudo por una curva en relación con la fecha de la lectura, dato que a veces está inscrito en la base del reloj de sol.

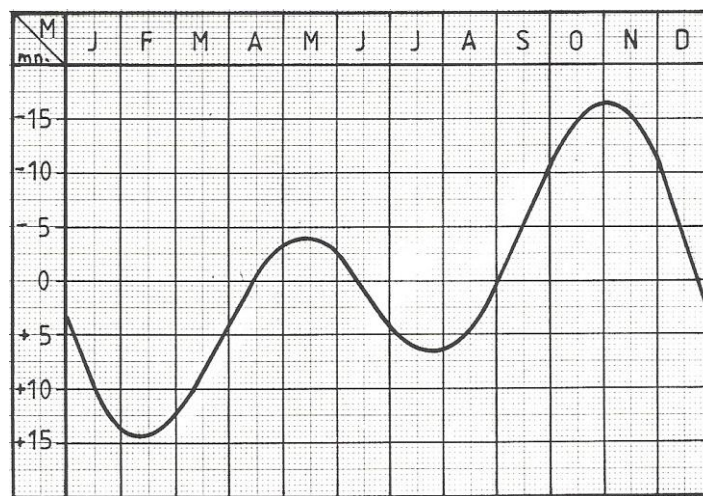


Fig. 5

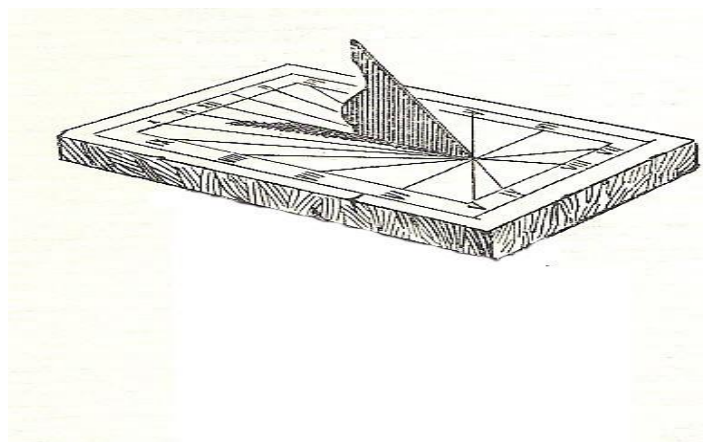


Fig. 6



2.3.- El anillo solar

De hecho es un reloj de sol en el que la sombra del índice ha sido reemplazada por un rayo de sol que pasa por un pequeño agujero hecho en el anillo.

Se orienta el instrumento en dirección al Sol, mientras se le mantiene colgado de su anilla.

El rayo solar produce una mancha luminosa sobre la cara interna del anillo, indicando la hora. Esta última se lee sobre la graduación inscrita en el interior del anillo solar.

Un cursor permite modificar la posición del agujero según la época del año y tener en cuenta así el valor de la declinación.

Por supuesto, la graduación interna corresponde a una latitud concreta.

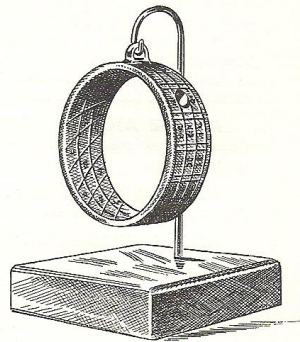


Fig. 7

2.3 El Nocturlabio

Este instrumento permite hallar el horario de una estrella circumpolar. Los astros más utilizados son Dubhe y Merak de la Osa Mayor, dos estrellas más conocidas bajo el nombre de Apuntadoras y que conducen hacia la Estrella Polar. Estas dos estrellas son un auténtico reloj celeste, más aún en nuestra época en que la Polar está muy cerca del polo celeste.

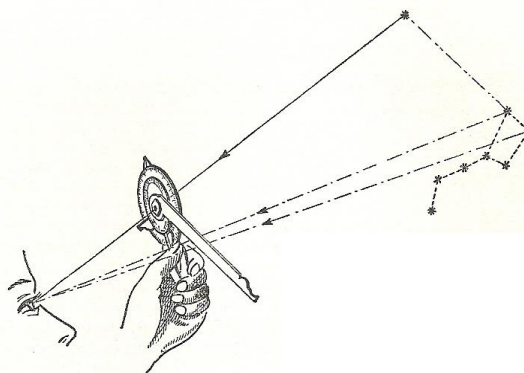


Fig. 8



Sin embargo, la posición de los Apuntadoras cambia cada día, y el nocturlabio permite ingeniosamente adaptar la medida.

Se observa a la Polar por el agujerito central del instrumento. Después se desplaza la aguja para alinearla con las Apuntadoras. Un disco secundario que gira sobre el centro del instrumento lleva grabado un calendario y una pestaña. Basta con llevar a dicha pestaña sobre la fecha de la medida y se puede leer la hora solar. Por supuesto este instrumento ignora el tema de la precesión y la nutación.

El nocturlabio, muy apreciado en la Edad Media, tuvo su momento de gloria en los siglos XVI a XVIII.

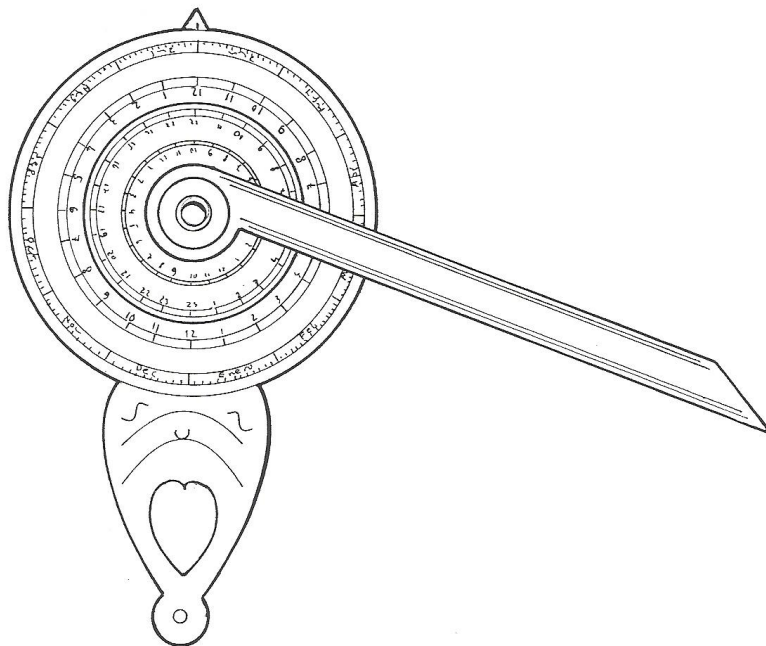


Fig. 9

2.4 El torquetum o tanawa

El torquetum es un instrumento utilizado para medir directamente coordenadas en tres planos, es decir el horizontal, el ecuatorial y el de la eclíptica, sin necesidad de cálculos.

El instrumento ya se utilizaba en el tiempo de Ptolomeo II y permitía medir la distancia lunar y la de otros cuerpos celestes, y con la ayuda de las tablas astronómicas establecidas por Eratóstenes (entonces director de la famosa biblioteca de Alejandría) permitía calcular la longitud del lugar de manera muy inteligente.

Dicho instrumento se ha perdido y ha sido reactualizado por Jabir Ibn Aflah en 1.110 DC en Sevilla.



Navegación astronómica

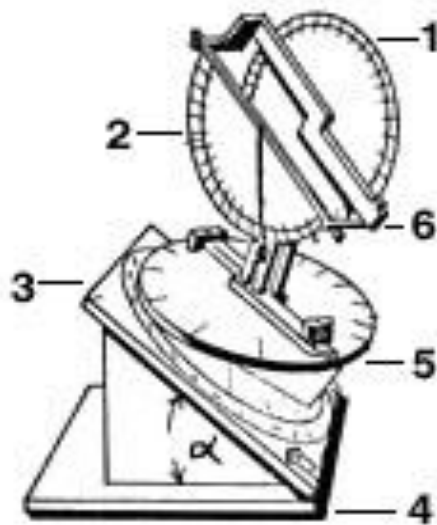
Evolución de los instrumentos de medida

Se ha encontrado un dibujo de un torquetum en las “Cuevas de los Navegantes”, situadas en una pequeña isla cerca de Nueva Guinea Occidental en latitud de 5° S y longitud 138° E.

En las mismas cuevas se encontraron también unas inscripciones relatando que en el año 232 AC una flotilla egipcia bajo el mando del Capitán Rata y del navegante Maui habría llegado a las costas occidentales de América. Esta información ha sido facilitada por el científico Rick Sanders en un texto publicado en la revista “Fusion” con el título de “Ancient navigators could have measured the longitude” en el año 2.002.

Se puede encontrar más información en la página Web
<21stcenturysciencetech.com>.

Esta navegación ordenada por los Faraones parece confirmada por inscripciones egipcias que se han encontrado en Tiguiririca (Chile).



- 1) limbo
- 2) alidada de alturas
- 3) plano ecuatorial
- 4) base horizontal
- 5) plano eclíptica ($23 \frac{1}{2}^{\circ}$)
- α) ángulo correspondiente a la co-latitud (90° - latitud)

Fig. 10 Elementos del torquetum



Fig. 11 Torquetum



3.- Los instrumentos para determinar la hora

De todos los inventos humanos cuyo objetivo es medir el transcurso del tiempo, solo mencionaremos aquí algunos instrumentos típicos, tengan o no relación con la navegación.

3.1 La clepsidra

También llamado reloj de agua, este instrumento para medir el tiempo está constituido de un recipiente lleno de agua, perforado en su parte inferior. El líquido se va por ese agujero y el nivel del agua restante indica las diferentes horas. Había incluso clepsidras con flotador, el cual movía una aguja que daba la hora.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig. 12

3.2 El reloj de arena o ampolleta

Este instrumento está constituido de dos conos opuestos por la punta y que comunican gracias a un pequeño orificio. Uno de los recipientes está lleno de arena calibrada. Se mide el tiempo que tarda la arena en pasar de un recipiente al otro, después se da vuelta al instrumento y todo vuelve a empezar.

¿Cuántos grumetes se habrán dormido sobre el reloj de arena? Probablemente tantos como cuartos.



Navegación astronómica

Evolución de los instrumentos de medida

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig, 13

Había relojes de arena o ampolletas para medidas típicas, destinados por ejemplo a la de la velocidad del barco por medio de una corredera y de su cordel (cuerda con nudos). Los cocineros tenían también sus relojes de arena para que los huevos estuvieran cocidos en su punto.

3.3 Relojes con pesas

Por supuesto, la utilización de pesas motrices hacía intransportables a tales relojes. Al cabo de un siglo de progresos técnicos, fue posible reemplazar las pesas por resortes que al desenrollarse ejercían sobre las ruedas dentadas el impulso necesario.

3.4 El cronómetro de marina

Hemos visto que desde el año 1600 los científicos de toda Europa tratan de inventar un instrumento para medir la hora que garantice una gran precisión. Nadie puede pretender ser el padre único del cronómetro de marina.

Sin embargo fue John HARRISON quien, después de una gran lucha, acabó cobrando el 09-02-1765 la recompensa de 20.000 libras con su cronómetro H-4.

Otros relojeros han construido también maravillas mecánicas para medir el tiempo. Mencionaremos en particular a Le Roy y al suizo Berthoud, bastante próximos a España.



Navegación astronómica

Evolución de los instrumentos de medida

En el Museo Naval de Madrid se exhibe un magnífico cronómetro de Ferdinand Berthoud con fecha de 1.787. La firma del constructor es señera de la historia de la cronometría y la Marina Española fué de las primeras que adquirieron las máquinas que salían de los talleres de este ilustre artista.

Por su parte, el Museo Internacional de Relojería de La Chaux-de-Fonds (Suiza) ha publicado un documento titulado "Ferdinand Berthoud, Relojero Mecánico del Rey y de la Marina". Un libro apasionante que podéis conseguir con ocasión de una igualmente apasionante visita al citado Museo, en estos montes que tantos cronómetros de marina ha producido.

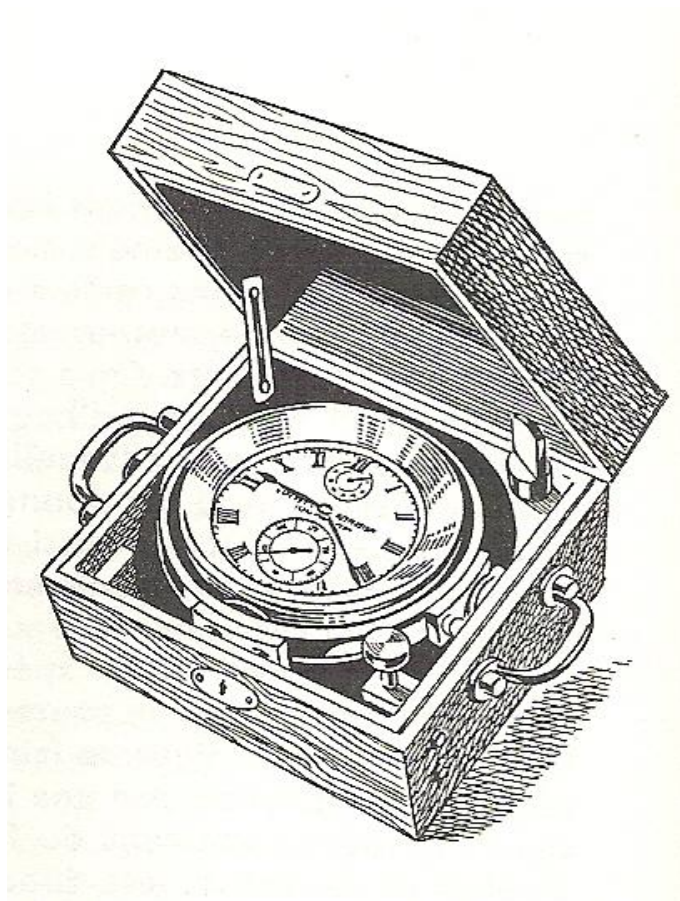


Fig. 14



4.- Medida de los ángulos

En tierra firme el primer instrumento para medir la altura del sol fue el gnomon. Como ya hemos visto, consiste en un palo hincado en la tierra, perpendicular al plano del horizonte, que proyecta una sombra inversamente proporcional a la tangente de la altura del astro.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig. 15

4.1.- El gnomon (o nomon)

Eratóstenes, astrónomo griego de la escuela de Alejandría, lo mejora fijándolo en una semiesfera graduada que permite leer la altura del astro en todo momento. Accesoriamente, esto permitió a este sabio medir el meridiano y la oblicuidad de la eclíptica.

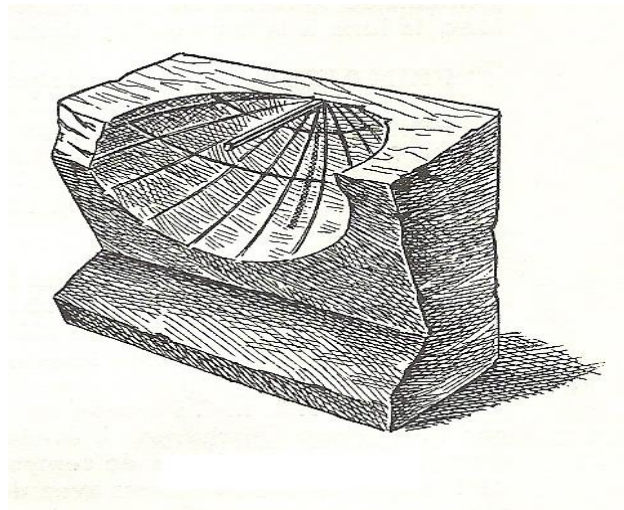


Fig. 16



4.2 El cuadrante

Como su nombre indica, el instrumento se compone de un cuarto de círculo graduado sobre el limbo. Uno de los radios estaba provisto de dos pínulas perforadas que permitían enmarcar al astro. Una plomada indicaba la vertical, y así se podía leer la altura del astro.

Se puede imaginar que el cuadrante no debía ser fácil de usar en un barco sobre la mar.

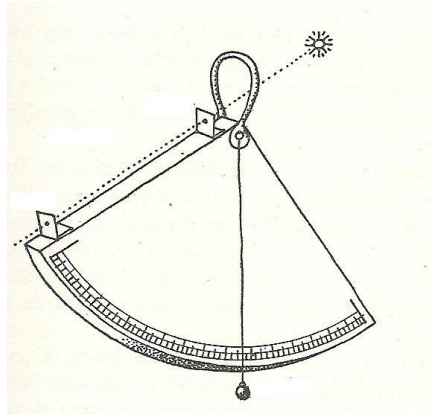


Fig. 17

4.3 El astrolabio marino

La invención del astrolabio se atribuye a HIPARCO, en el siglo II a. C. La versión marina es del siglo XV.

Derivado del instrumento creado por y para los astrónomos, el astrolabio marino se reduce a una simple corona metálica o rueda o también margarita con cuatro radios, uno de los cuales es más macizo para lastrar bien a ese instrumento. El astrolabio estaba provisto de un punto de suspensión, generalmente un anillo. La pínula o alidada permite apuntar al astro por dos aberturas y las graduaciones permiten observar la altura de éste, única misión que queda al astrolabio marino con respecto a su uso astronómico.

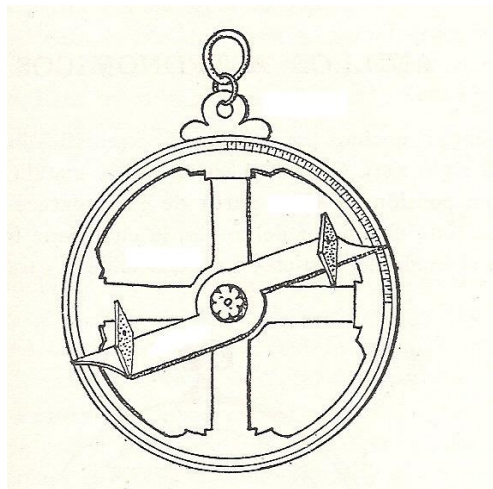


Fig. 18



El astrolabio fue utilizado en la mar en los siglos XV al XVIII.

Ha habido modelos constituídos de dos coronas concéntricas pudiendo deslizarse la una con respecto a la otra, las pínulas estaban fijadas sobre el círculo interior, y el exterior mostraba las graduaciones.

En la mar la precisión obtenida era del orden de 5° , y en tierra inferior a un grado.

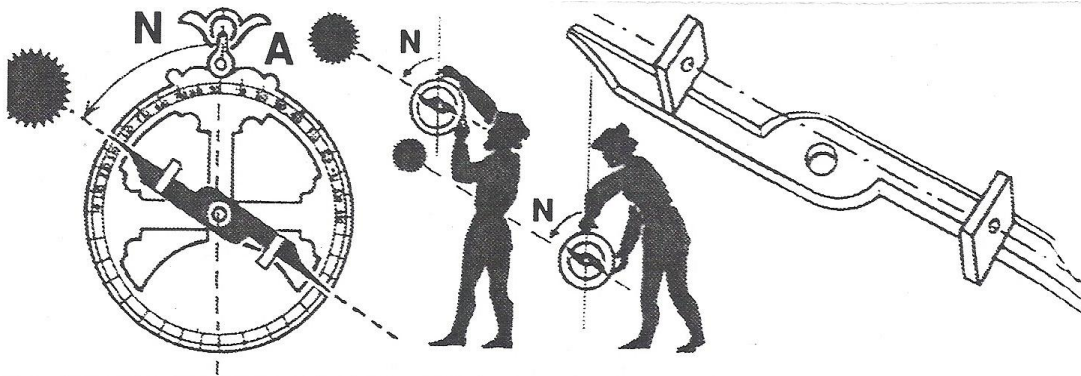


Fig. 19

4.4 La ballestilla

Este instrumento, también llamado bastón de Jacobi (*baculus Jacobi*), *radius astronomicus* o arbaestrilla fue descrito por primera vez por el astrónomo judío catalán Leví BEN GERSON a mediados del siglo XIV.

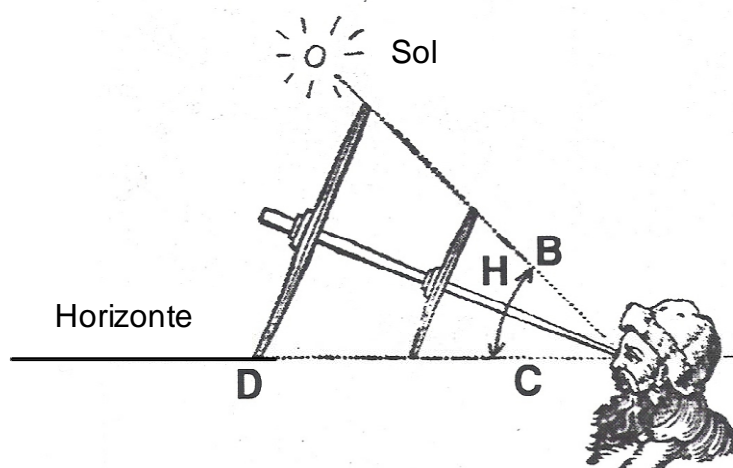


Fig. 20

La ballestilla se compone de una regla llamada flecha, o verga, por la cual se desliza una escuadra doble llamada martinete o sonaja o transversario. La verga está graduada y se puede deslizar la sonaja sobre la flecha.



Existen ballestillas de hasta 120 cm de largo, con dos, incluso tres transversarios que miden de 4 a 30 cm y permiten observar más fácilmente ángulos pequeños o grandes. Esto requiere tres graduaciones diferentes sobre la verga, generalmente una escala en cada cara de la flecha.

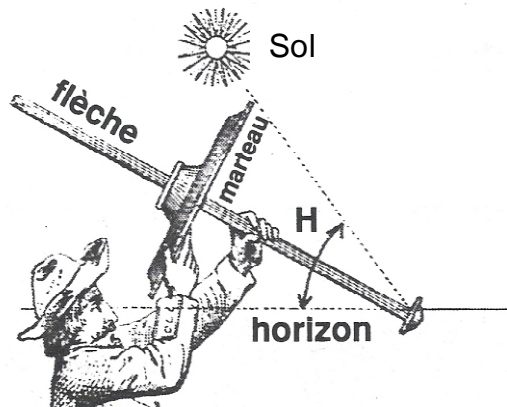


Fig. 21

Para medir la altura del sol y no verse deslumbrado por él, se fija una pantalla en el extremo de la verga y se coloca la sombra de la sonaja sobre esta pantalla, alineando al mismo tiempo la parte inferior del martinete sobre el horizonte. Esto significa que el observador se pone de espaldas al sol, contrariamente a la utilización para una estrella que se toma en observación directa.

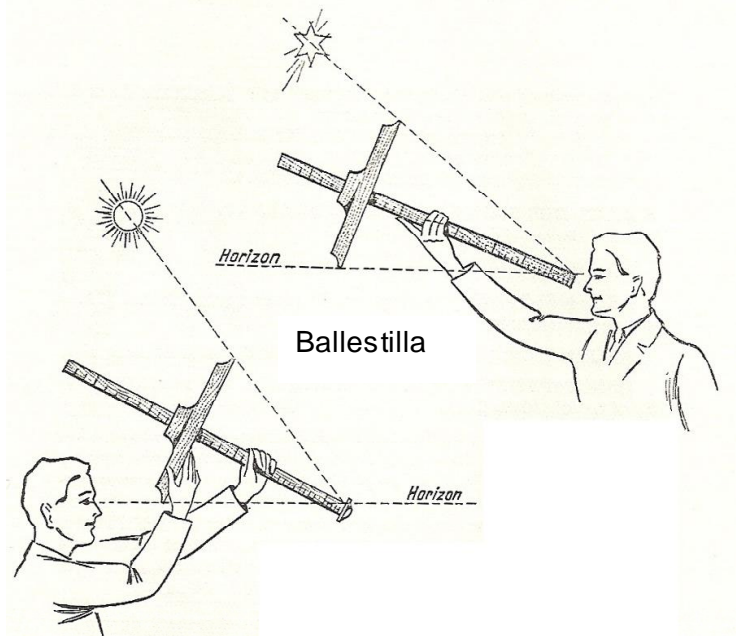


Fig. 22

La utilización no es muy práctica y el cero del instrumento es difícil de estimar. Utilizado en la mar desde le siglo XV, el bastón de Jacobi estuvo en uso hasta finales del XVII. No permite medir ángulos grandes.



4.5 El kamal

Basado en el mismo principio que la ballestilla, el Kamal era muy utilizado en los sambukes árabes en los mares orientales.

El instrumento es una simple pieza de madera rectangular, horadada en su centro para fijar en ella una cuerdecilla de nudos.

La medida consistía en hacer coincidir el horizonte con la parte inferior de la tablilla y el astro con la parte superior. El instrumento se mantenía a una distancia concreta para cada utilizador, medida a partir del pómulo contando cierto número de nudos.

Existe un instrumento similar, metálico, en las Bermudas.

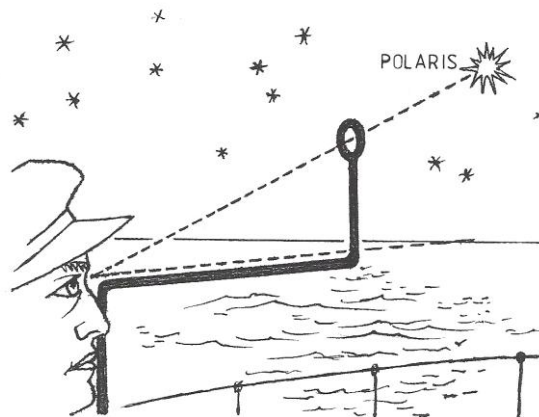


Fig. 23

El kamal permitía hallar una latitud, por medio de la Polar o la meridiana por ejemplo, solución muy utilizada en la navegación de la época para las grandes travesías.

4.6 El cuadrante inglés

Se trata de una mejora de la ballesta propuesta en 1594 por el inglés John DAVIS, motivo por el cual se halla también este instrumento con el nombre de cuadrante de DAVIS, cuadrante doble o back staff.

Está compuesto de dos sectores con un centro común, el uno de 60° , el otro de 30° . Una pínula situada en el centro común de los sectores estaba provista de una abertura longitudinal por la cual se podía ver el horizonte. Otra pínula, paralela a la primera, se movía por el sector superior (60°). La tercera se deslizaba por el sector inferior (30°). Estas dos pínulas llevaban un agujero circular.

Para observar el sol, se hacía coincidir el agujero de la tercera pínula con la hendidura del horizonte y se movía la segunda pínula hasta que el rayo de sol pasara por su abertura y se hallara él también sobre el horizonte.



Navegación astronómica
Evolución de los instrumentos de medida

La altura del astro era la suma de los dos ángulos medidos sobre ambos arcos.

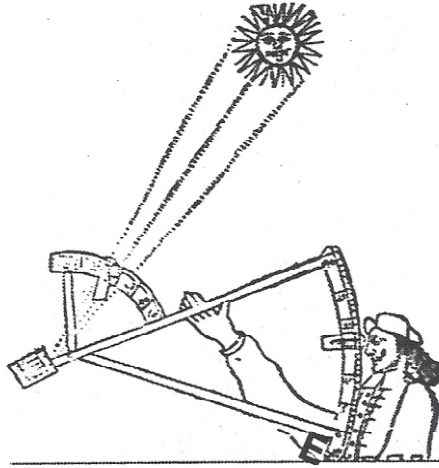


Fig. 24

Este instrumento ha sustituido ampliamente al Cuadrante con su plomada. El cuadrante inglés desaparecerá a su vez con la llegada del Octante y el principio de los instrumentos ópticos, provistos de espejos.

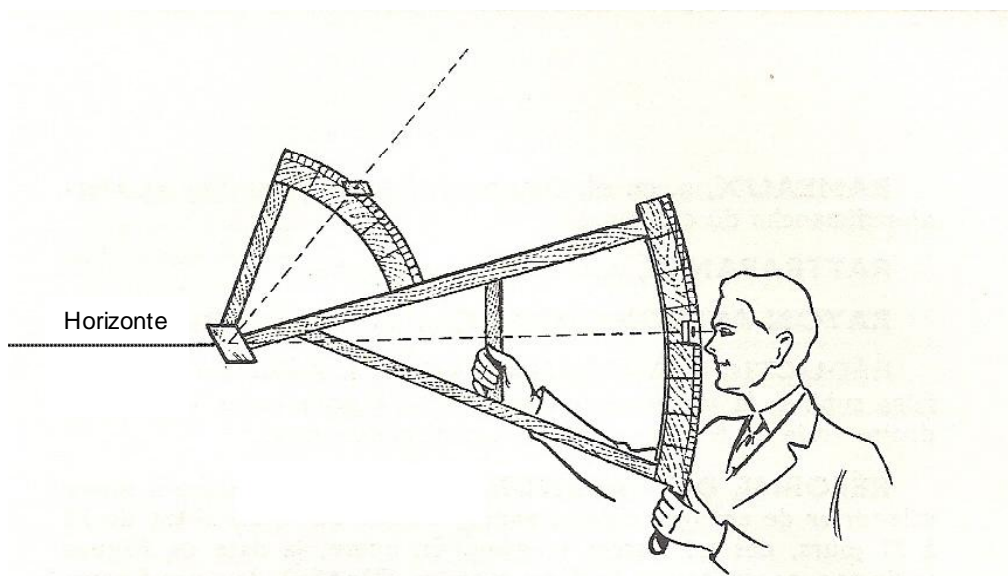


Fig. 25



4.7 El octante

Hay que esperar a 1731 para que John HADLEY presente a la Real Academia de Ciencias de Londres el primer instrumento que utilizaba espejos y óptica, el octante. Fue un paso notable en el progreso de la evolución de los instrumentos que permiten medir la altura de los astros sobre el horizonte. Este instrumento tiene como padres a grandes científicos como NEWTON, HOOKE o GRANDJEAN DE FOUCHY y muchos otros.

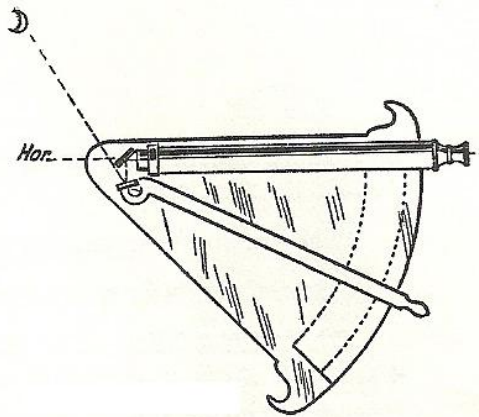


Fig. 26

Básicamente, el instrumento se compone de un limbo de un octavo de círculo, de ahí su nombre. Este limbo permite medir ángulos de 0 a 90°. Hallamos por primera vez en la graduación del limbo la introducción de escalas transversales, las antepasadas del Nonius y del Vernier. La lectura se vuelve así más precisa. La precisión de las medidas es del orden del minuto. El octante ha sido utilizado hasta mediados del siglo XX.

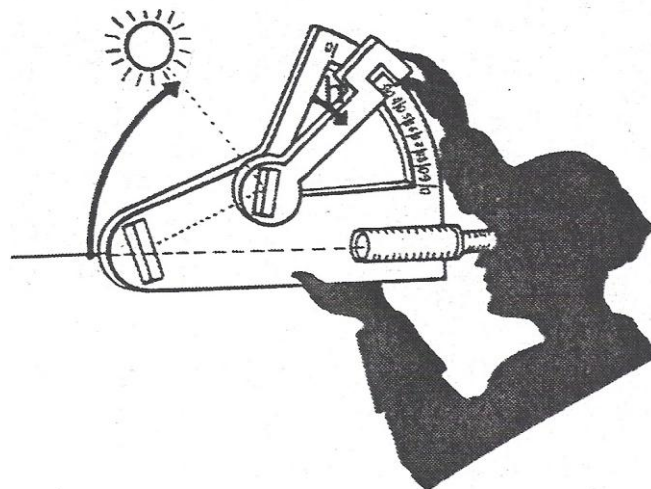


Fig. 27



4.8 El sextante

La necesidad de medir ángulos de más de 90° (por ejemplo para las distancias lunares) ha conducido a la elaboración del instrumento conocido con el nombre de sextante.

Su invención se atribuye al Capitán CAMPBELL, en 1757.

Se compone de un limbo metálico con una abertura de 60° (hoy día 70°), de ahí su nombre de sextante.

Dos espejos, el grande (o de índice) y el pequeño (o de horizonte), permiten efectuar medidas aplicando las reglas de la óptica.

El espejo grande, situado en el centro geométrico del limbo, gira con el índice. Es perpendicular al plano del instrumento.

El espejo pequeño está fijado sobre el limbo, al lado opuesto del anteojo. Este espejo de horizonte está constituido de una parte reflectante y de otra parte transparente. Por lo tanto se puede ver a la vez el horizonte por la parte transparente y la imagen del astro en la mitad de espejo. Al superponerse así las dos imágenes en el anteojo, se puede leer sobre la escala del limbo el valor del ángulo medido.

El astro se ve por doble reflexión en el anteojo.

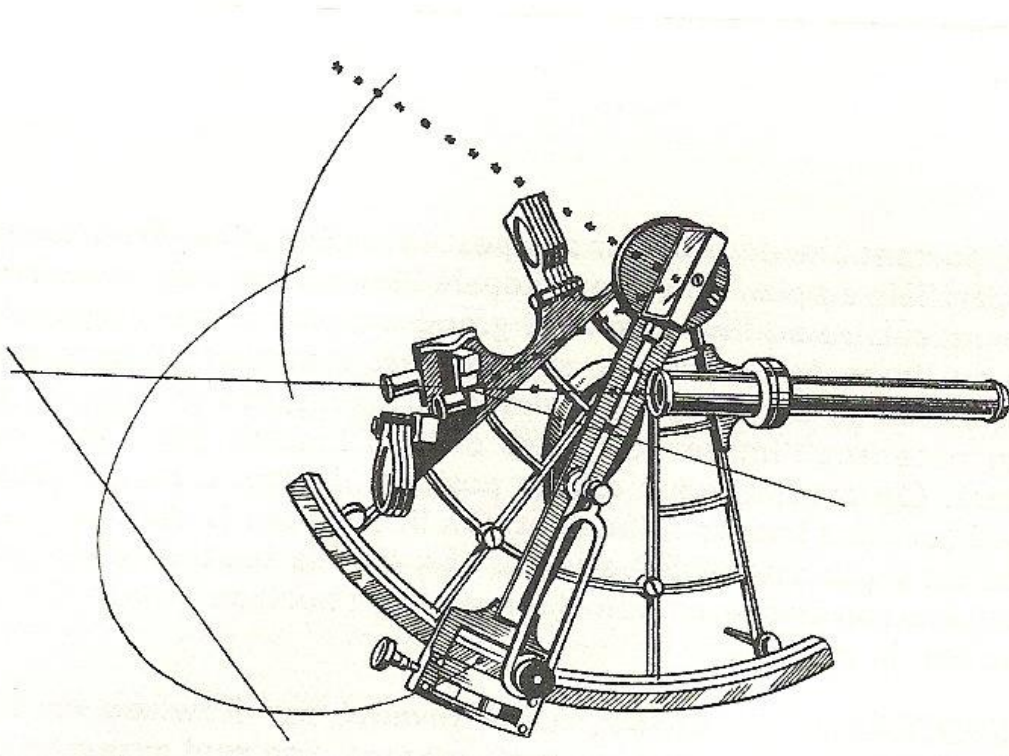


Fig. 28



Hoy día un tambor micrométrico con nonius permite más precisión en la medida, sin necesidad de utilizar un nonius o otro dispositivo similar.

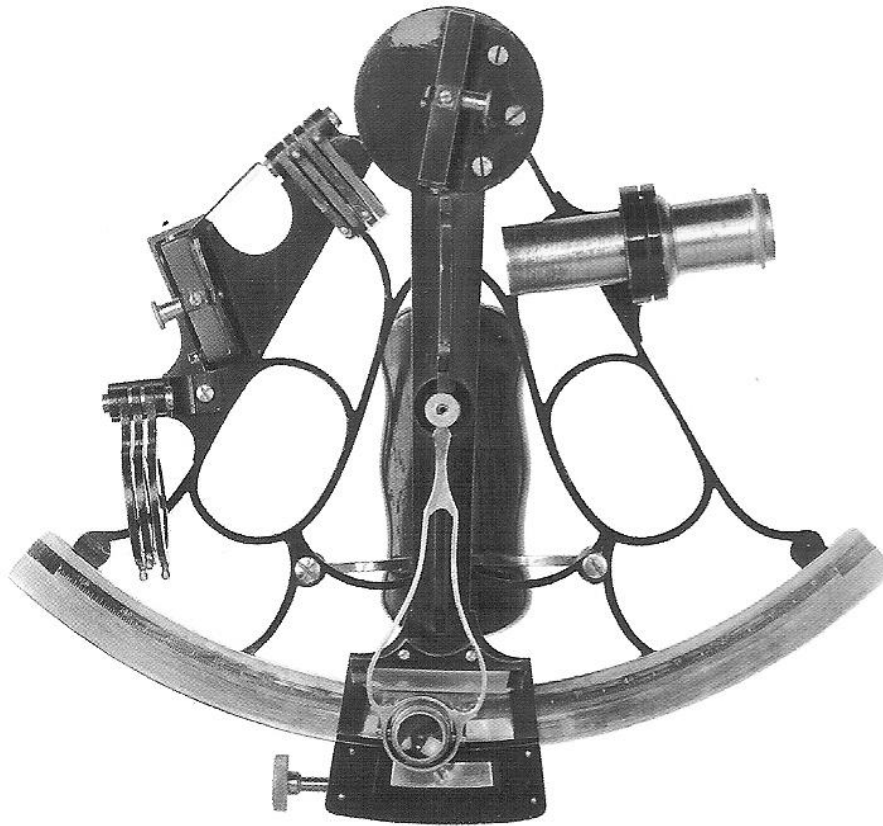


Fig. 29

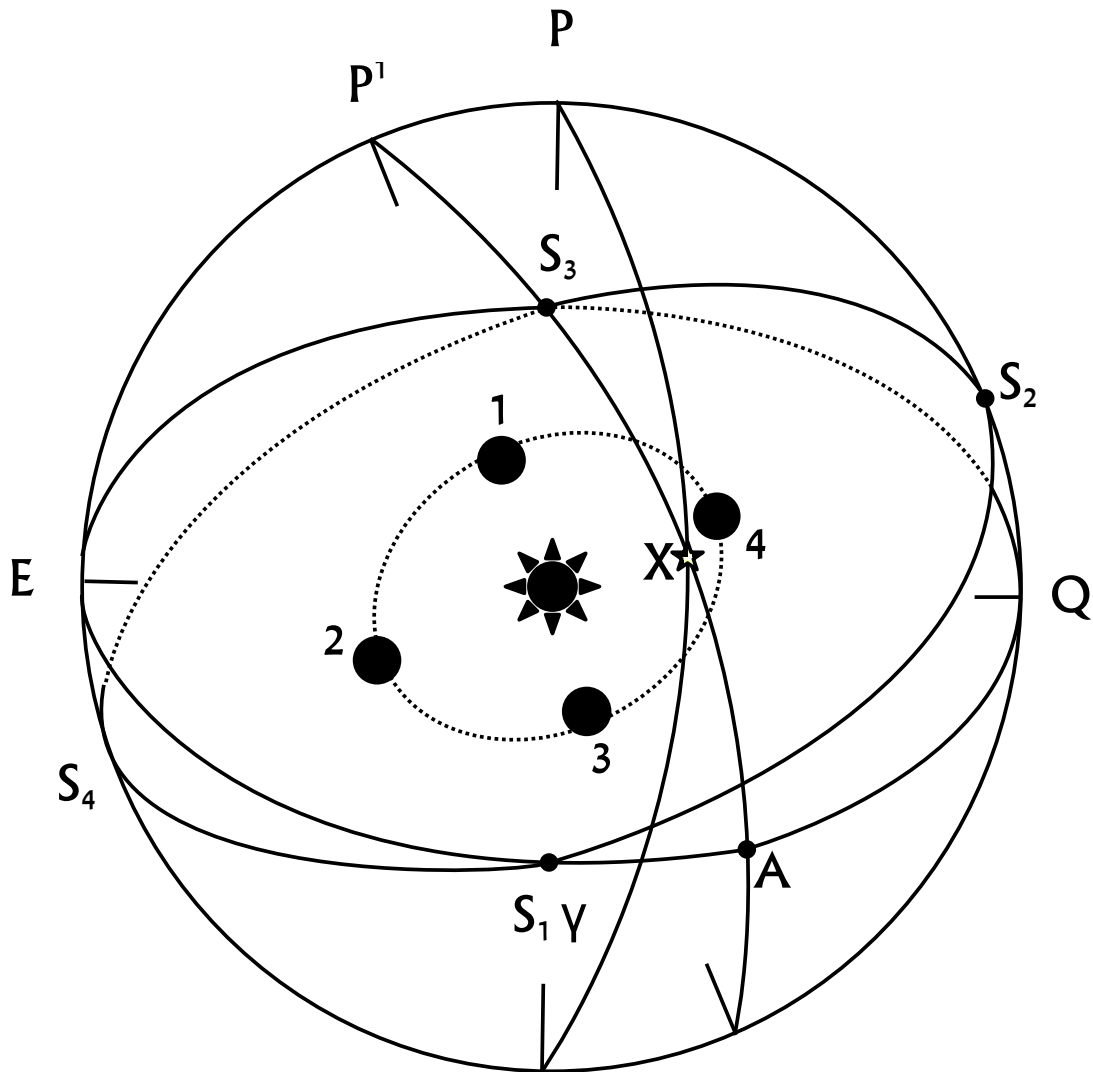
Se pueden insertar filtros de colores delante del espejo grande para atenuar el brillo de los rayos del sol. También hay filtros para mejorar la definición del horizonte. En los modelos más actuales, se usa un espejo de visión unidireccional para el horizonte y los filtros se sustituyen por una óptica de tipo Polaroid.

Con la calidad de la microtécnica actual y las cualidades de la óptica de este milenio, hemos alcanzado los límites de la perfección de medidas que se pueden tomar con un sextante. El instrumento se ha vuelto más preciso que el ojo humano.

En el mejor de los casos, se puede medir con una precisión de un cuarto de minuto, es decir un cuarto de milla. Sin embargo, generalmente se considera que en un yate en alta mar, una precisión del orden de 1 a 2 minutos de ángulo ya es una auténtica hazaña.



MOVIMIENTO APARENTE DE LOS ASTROS



E, S₁, Q, S₃ representa el plan del ecuador celeste,
 S₁, S₂, S₃, S₄ representa el plano de la eclíptica en el cual se mueve relativamente el Sol.
 P, polo celeste
 P', polo de l'eclíptica

1, posición de la Tierra el 21-03, equinoccio du primavera	D = 0°
2, posición de la Tierra el 21-06, solsticio de verano	D = 23,5°N
3, posición de la Tierra el 22-09, equinoccio de otoño	D = 0°
4, positón de la Tierra el 22-12, solsticio de invierno	D = 23,5°S

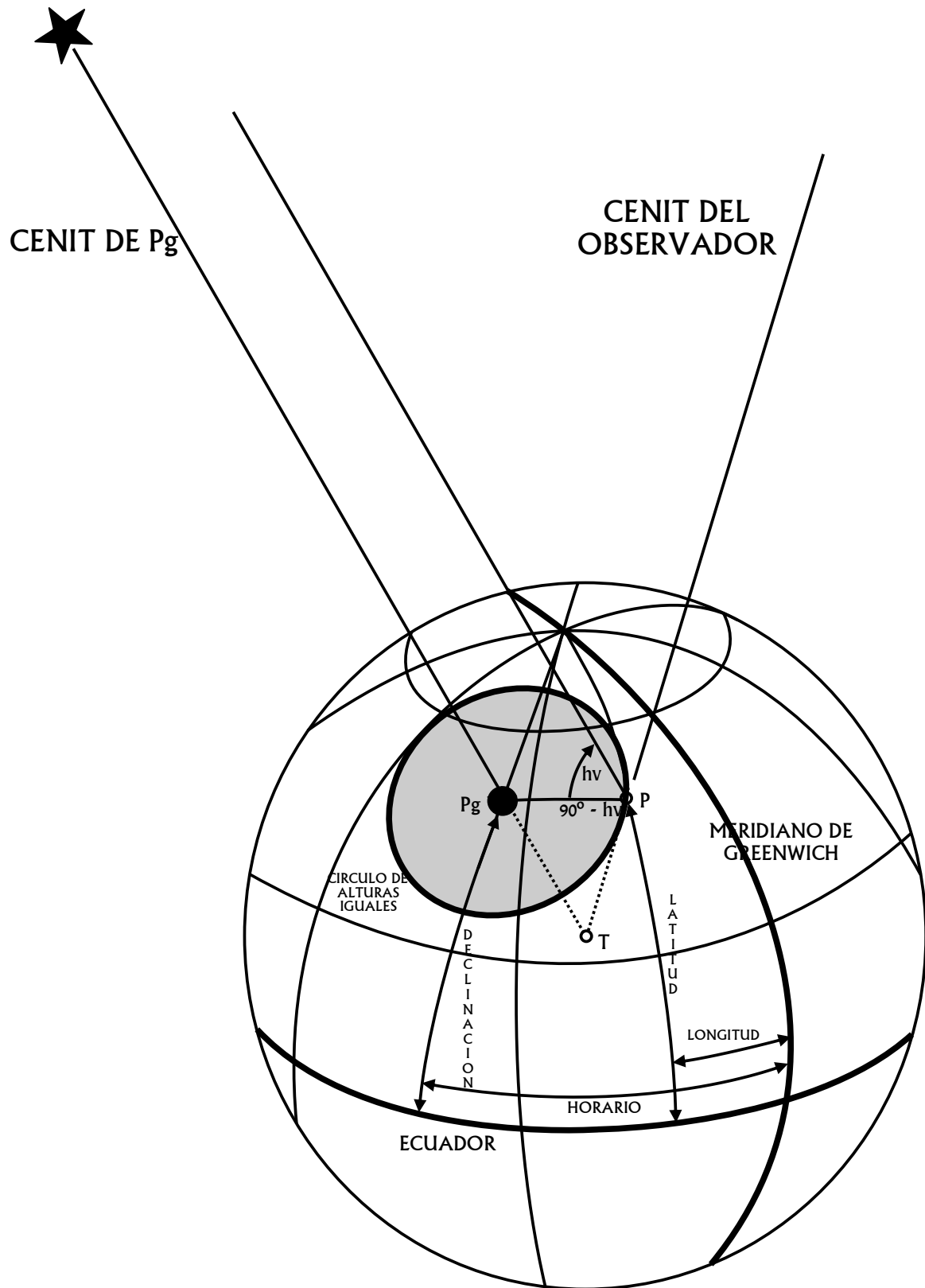
X, una estrella

Y-A, su ascension derecha (ángulo sidéreo)

X-A su declinacion



PRINCIPIO DE LA DETERMINACION DE LA POSITION

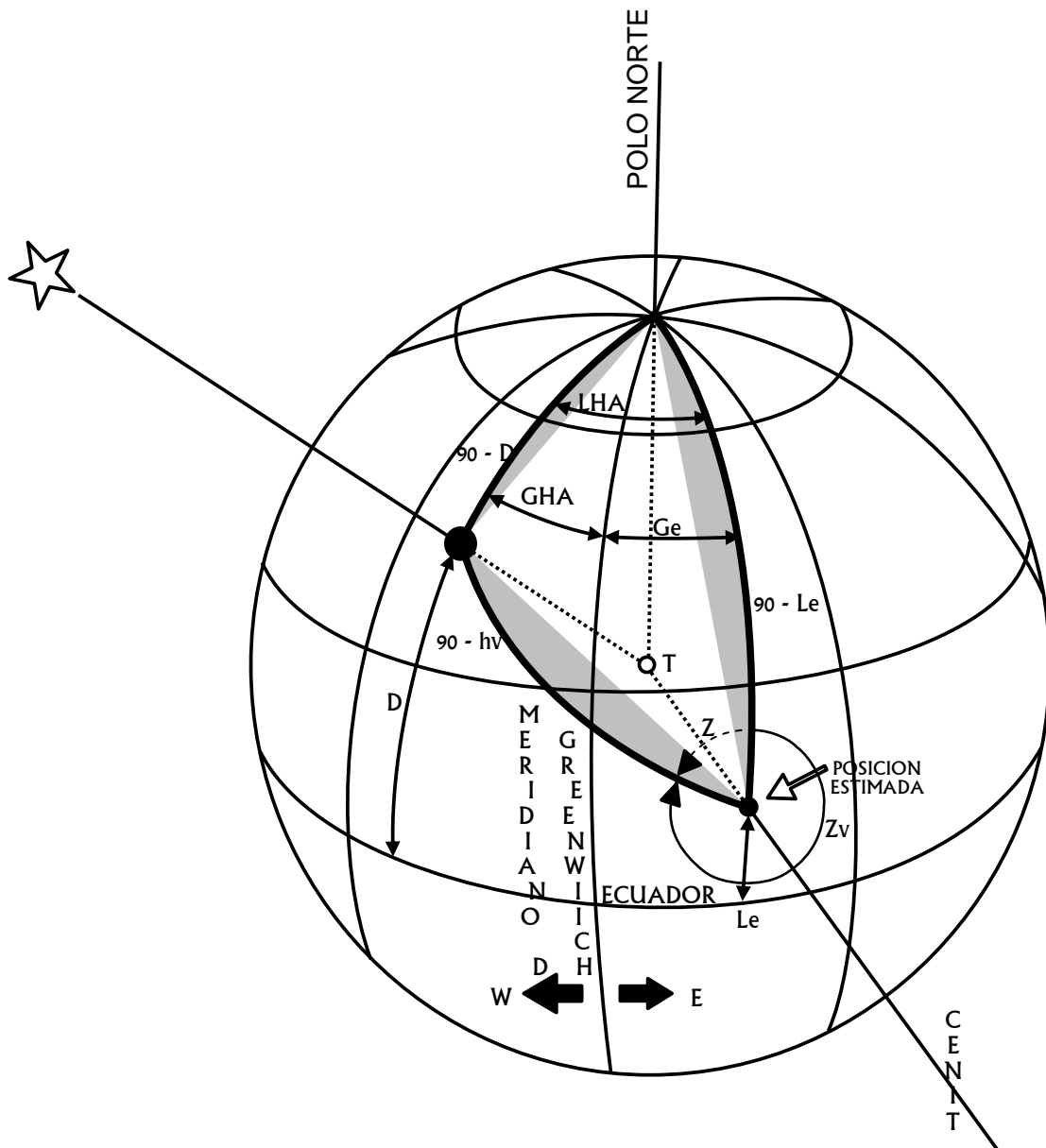




TRIANGULO DE POSICIÓN

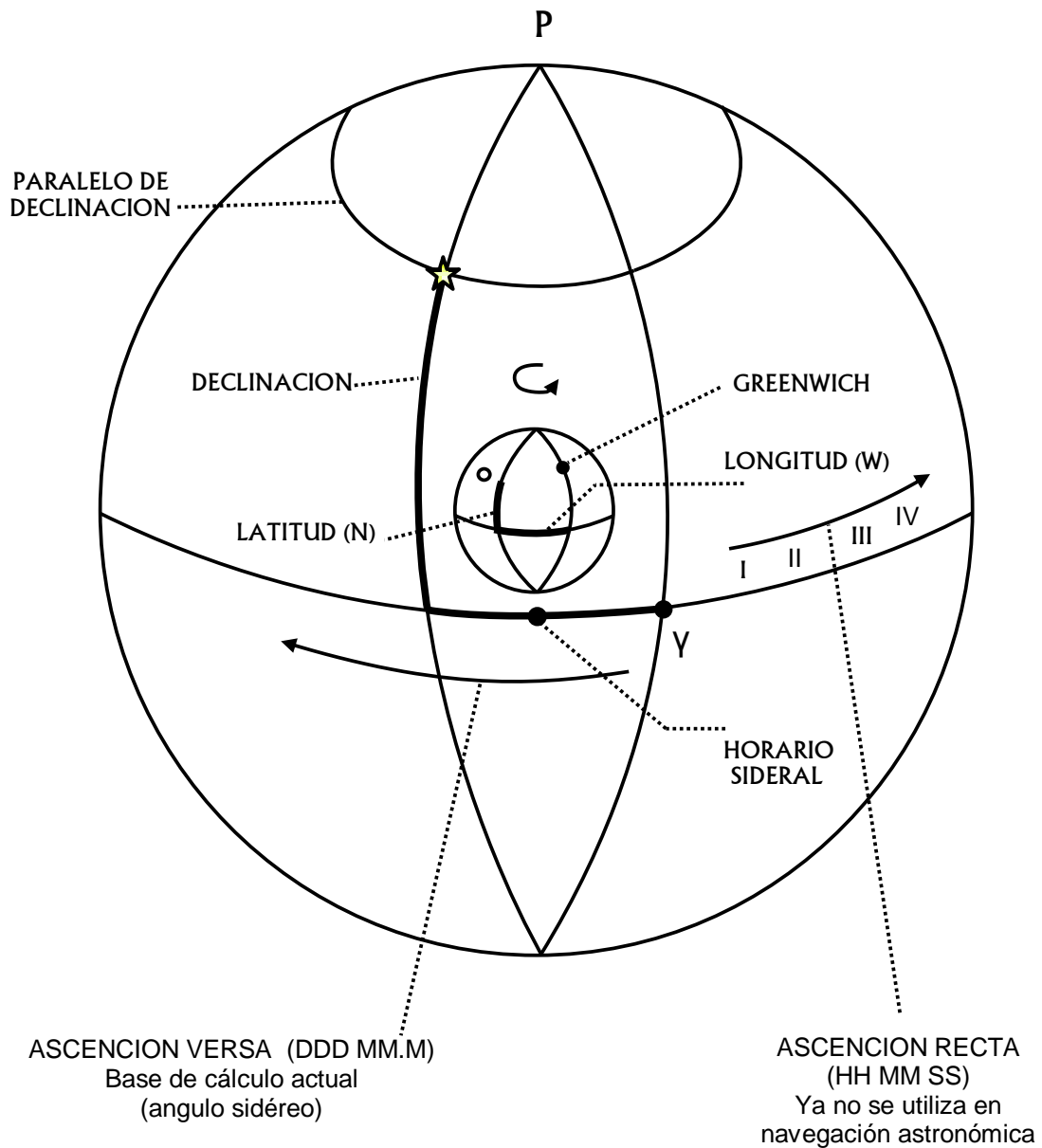
$$\text{Sen } H_v = \text{Sen } L_e \cdot \text{Sen } D + \text{Cos } L_e \cdot \text{Cos } D \cdot \text{Cos } LHA$$

$$\text{Cotg } Z = \text{Sen } L_e \cdot \text{Cotg } LHA - \text{Tg } D \cdot \text{Cos } L_e / \text{Sen } LHA$$



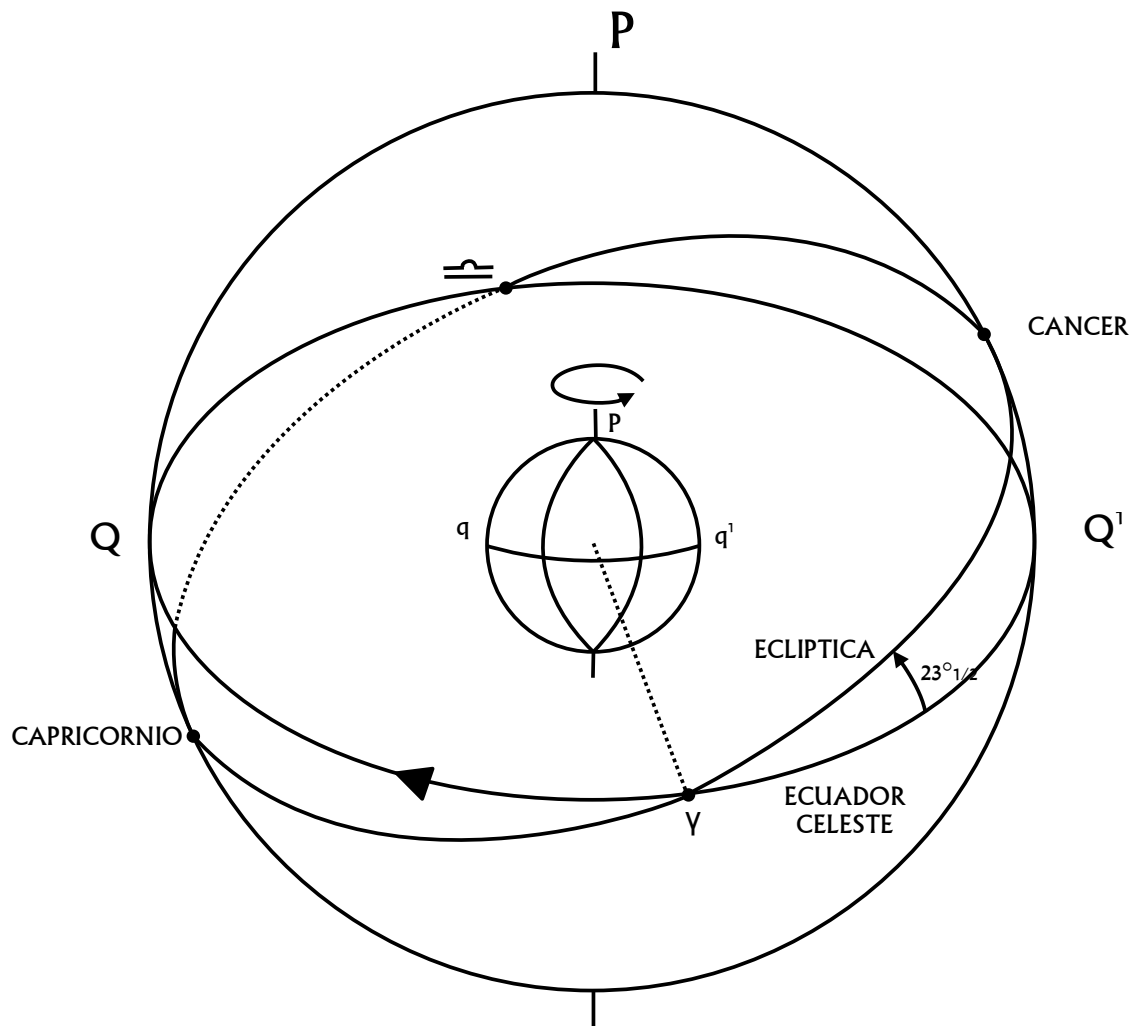


COORDENADAS TERRESTRES Y CELESTES





LA ESFERA CELESTE



P = Polo celeste (el cenit del polo geográfico terrestre).

QQ' = Ecuador celeste (prolongación del ecuador terrestre).

Eclíptica = plano en el cual parece moverse el sol de modo relativo. El ángulo entre el plano del ecuador celeste y la eclíptica es de $23 \frac{1}{2}^\circ$ aproximadamente.

γ = Punto vernal o de Aries, es decir la posición que ocupa el sol en el momento del equinoccio de primavera.



Navegación astronómica

Fórmulas de cálculo

LATITUD POR ALTURA MERIDIANA DEL SOL	
Fecha : <u>29-04-2007</u>	Elevación del observador : <u>3</u> m
Situación estimada, Se : Le = <u>29° 50' N</u> S	Ge = <u>119° 49' E</u> W
HORA DE PASO POR EL MERIDIANO	
Paso por Greenwich (PMG) <u>11 h 57 m 24 s</u>	Ge <u>119°</u> = <u>7 h 56 m</u>
Ge (E - W+) ± <u>7 h 59 m 16 s</u>	<u>49'</u> = <u>3 m 16 s</u>
Paso por el Meridiano Se	= <u>7 h 59 m 16 s</u>
PM (UT) <u>03 h 58 m 08 s</u>	
DECLINACION	
PM (UT) <u>03 h</u>	D <u>14° 19.1' N</u> S
Pp. d <u>58 m</u>	d = <u>+ 0.8'</u>
D = <u>14° 19.9' N</u> S	
ALTURA VERDADERA	
Altura instrumental =	<u>74° 12.0'</u>
Corrección instrumental	<u>04.0'</u>
Ho	<u>74° 16.0'</u>
Corr. 1	<u>+ 12.8'</u>
Corr. 2	<u>- 00.2'</u>
Altura verdadera	Hv = <u>74° 28.6'</u>
LATITUD	
Altura verdadera, Hv -	<u>74° 28.6'</u>
Distancia cenital, Dc =	<u>15° 31.4'</u>
Declinación, D	± <u>14° 19.9'</u>
Latitud = <u>29° 51.3' N</u> S	
	$90^\circ - Hv + DN = LN$ $+ DS = LS$ $- DN = LS$ $- DS = LN$
O la fórmula matemática : Culminación mirando al N : $L = D - Dz$ Culminación mirando al S : $L = D + Dz$ Declinaciones y latitudes son - positivas si son Norte - negativas si son Sur	



Navegación astronómica

Fórmulas de cálculo

RECTA DE ALTURA	
Fecha : <u>11-10-2007</u> Astro : <u>SOL</u> Elevación del observador : <u>4</u> m Situación estimada, Se : Le <u>45° 20' N</u> S Ge <u>010° 11' E</u> W	
HORA TU de la observación : <u>09</u> h <u>18</u> m <u>43</u> s	
LHA TU <u>09</u> h HA <u>318° 17.2'</u> v = <u> </u> <u>18</u> m <u>43</u> s pp. + <u>4</u> <u>40.8'</u> GHA <u>322° 58.0'</u> (E + ; W -) Ga ± <u>9° 58.0'</u> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">LHA = <u>313° - -'</u></div>	DECLINACION D <u>6° 56.1'</u> N S d = <u>+0.9</u> pp. d ± <u>0.3'</u> TT = <u> </u> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">D = <u>6° 56.4'</u> N S</div>
ALTURA CALCULADA Da <u>6°</u> N S 180° (Latitud S) La <u>45°</u> N S 360° (Latitud N) HO / AP <u>23° 56'</u> ± <u>49</u> - <u>127°</u> Same Contrary Cor. ± <u>-46'</u> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hc = <u>23° 10'</u></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Zv = <u>127°</u></div> </div>	
ALTURA VERDADERA Altura instrumental, Hi <u>22° 18.0'</u> (<u> </u>) Corrección instrumento <u>+2.3</u> Ho <u> </u> Ho <u>22° 20.3'</u> Corr. 1 - <u> </u> Corr. 1 <u>+10.2</u> Ha <u> </u> Corr. 2 <u>+0.1</u> Corr. 2 + <u> </u> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hv = <u>22° 30.6'</u></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">∅ - <u> </u></div> </div> Hv <u> </u>	
INTERCEPT (Δa) Altura verdadera Hv <u>22° 30.6'</u> Hv < Hc → Más lejos Altura calculada Hc = <u>23° 10.0'</u> Hv > Hc → Más cerca <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">Intercept (Δa) = <u>39.6'</u></div>	
RECTA DE ALTURA Punto auxiliar Pa La = <u>45° N</u> S Ga = <u>009° 58'</u> E W Azimut Zv = <u>127°</u> Intercept <u>39.6</u> Millas más lejos / más cerca	



LATITUD POR ALTURA DE LA POLAR	
Fecha : <u>23-04-2007</u>	Elevación del observador : <u>4</u> m
Situación estimada, Se : Le <u>46</u> ° <u>10</u> ' N Ge <u>010</u> ° <u>46</u> ' E W	
HORA TU de observación : <u>19</u> h <u>56</u> m <u>16</u> s	
ANGULO HORARIO SIDERAL	
TU <u>19</u> h	HA γ <u>136</u> ° <u>26.5</u> ' <u>56</u> m <u>16</u> s pp. + <u>14</u> ° <u>06.3</u> ' GHA γ <u>150</u> ° <u>32.8</u> ' (E + ; W -) Ge \pm <u>10</u> ° <u>46.0</u> ' LHA γ = <u>139</u> ° <u>46.8</u> ' « Q » = <u>+ 8</u> '
ALTURA VERDADERA	
Altura instrumental, Hi = <u>46</u> ° <u>07.5</u> ' Corr. instrumentales \pm <u>- 3.0</u> ' Ho <u>46</u> ° <u>04.5</u> ' Corr. astronómicas <u>- 4.5</u> ' Hv = <u>46</u> ° <u>00.0</u> ' 	
LATITUD	
Altura verdadera, Hv = <u>46</u> ° <u>00.0</u> ' Tabla I \pm <u> </u> Tabla II \pm <u> </u> Tabla III + <u> </u>	HO 249 Altura verdadera Hv = <u>46</u> ° <u>00.0</u> ' Tabla 6, « Q » \pm <u>+ 8.0</u> ' Latitud = <u>46</u> ° <u>08</u> ' N Latitud = <u>46</u> ° <u>08</u> ' N



Navegación astronómica

Fórmulas de cálculo

SITUACION POR RECTAS DE ALTURA DE ESTRELLAS											
Fecha : <u>11-10-2007</u> Salida / Puesta				Elevación del observador : <u>4</u> m							
Situación estimada, Se : Le = <u>37° 35' N</u> S				Ge = <u>020° 20' E</u> W							
CALCULO PREPARATORIO											
Hora TU orto / ocaso del ☉ en meridiano origen				<u>17_h_30_m</u>				HA γ <u>259° 51.9'</u>			
Crepúsculo mediano (orto - ; ocaso +)				15 m				p.p. ± <u>6° 01.0'</u>			
Hora de observación en meridiano origen				<u>17_h_45_m</u>							
Ge <u>020°</u> = <u>1_h_20_m</u>								GHA γ <u>265° 52.9'</u>			
Ge <u>20'</u> = <u>1_m</u>								Ga ± <u>20° 20.0'</u>			
Ge (E-, W+)				± <u>1_h_21_m</u>				LHA γ <u>286° 12.9'</u>			
Hora prevista de observación en la Se				TU <u>16_h_24_m</u>				Estrellas seleccionadas :			
Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn
ALTURAS CALCULADAS				Altair		Arcturus		Kochab			
Estrellas observadas											
Hora observación TU				16 h 20 m 44 s		16 h 24 m 18 s		16 h 27 m 01 s		h m s	
HA γ				259° 51.9'		259° 51.9'		259° 51.9'		° '	
p.p. +				5° 11.9'		6° 05.5'		6° 46.4'			
GHA γ =				265° 03.8'		265° 57.4'		266° 38.3'			
(+ E, - W) Ga ±				20° 56.2'		20° 02.6'		20° 21.7'			
LHA γ =				286° -----		286° -----		287° -----		° -----	
HO 249 La_37° N S				Hc	Zv	Hc	Zv	Hc	Zv	Hc	Zv
				59 56	156	25 29	276	42 20	341		
ALTURAS VERDADERAS				59° 21.5'		25° 24.5'		42° 47.0'			
Altura instrumental, Hi				+ 2.6'		+ 2.6'		+ 2.6'			
Corr. Instrumento ±				59° 24.1'		25° 27.1'		42° 49.6'			
Altura observada, Ho =				- 4.1'		- 5.6'		- 4.6'			
Corr. astronómicas ±				59° 20.0		25° 21.5'		42° 45.0'			
Altura verdadera, Hv =				59° 20.0'		25° 21.5'		42° 45.0'		° '	
INTERCEPTS (Δa)				59° 56.0'		25° 29.0'		42° 20.0'			
Altura verdadera Hv				36.0 M		7.5 M		25.0 M		M	
Altura calculada Hc				156°		276°		341°		°	
Intercept (Δa)				cerca lejos		cerca lejos		cerca lejos		cerca lejos	
Azimut				20° 56.2'		20° 02.6'		20° 21.7'		° '	
Más cerca lejos				37° -----		37° -----		37° -----		° -----	
Longitud auxiliar											
Latitud auxiliar											
Hv < Hc Más lejos				Precesión, Nutación : <u>1</u> M al <u>085</u> °							
Hv > Hc Más cerca				Situación: L = <u>37° 25' N</u> / G = <u>020° 14' E</u>							