

Navegación Aérea

Jorge O. Garcia

2015

Índice

1. Introducción	4
2. Métodos de Navegación Aérea	6
2.1. Navegación Autónoma	6
2.1.1. Navegación Observada [1]	6
2.1.2. Navegación a Estima (Dead Reckoning) [2]	6
2.1.3. Navegación por Fijación de la Posición	8
2.2. Navegación Aérea No Autónoma	10
2.2.1. Ayudas visuales	10
2.2.2. Radioayudas	11
2.2.3. Navegación por satélite	12
3. Métodos para determinar la posición [2]	15
3.1. Método $\theta - \theta$	15
3.2. Método $\theta - \rho$	16
3.3. Método $\rho - \rho$	17
3.4. Método hiperbólico	17
4. La Tierra	18
4.1. Forma, tamaño y movimientos	18
4.2. Coordenadas geográficas	20
5. Distancia, dirección, tiempo, el Norte	24
5.1. Distancia	24
5.2. Dirección	25
5.2.1. Definiciones	26
5.3. Tiempo	27
5.3.1. Tiempo solar	28
5.3.2. Greenwich Mean Time	30
5.3.3. Tiempo Universal (UT)	30
5.3.4. Temps Atomique International (TAI)	30
5.3.5. Tiempo Universal Coordinado (UTC)	31
5.3.6. Tiempo GPS (GPST)	31
5.3.7. Tiempo Loran-C	31
5.4. El Norte	31
6. Cartas de navegación aeronáutica	33
6.1. Proyecciones cartográficas	34
6.2. Las cartas OACI [2]	37
6.2.1. Cartas OACI obligatorias	38
6.2.2. Cartas OACI condicionales	40
6.2.3. Cartas OACI opcionales	41
6.2.4. La carta OACI 1:500 000	41
6.3. Cartas de aproximación instrumental (IAC = Instrumental Approach Charts)	43
6.4. Cartas de salida normalizada (SID = Standar Instrument Departure)	43
6.5. Cartas de llegada normalizada - (STAR - Standar Terminal Arrival Chart)	43

Glosario

45

A. Lista de Acrónimos

47

1. Introducción

La navegación puede definirse como el conjunto de técnicas utilizadas para desplazarse entre un par de puntos conocidos, llamados origen y destino, siguiendo una Trayectoria también conocida. Para esto es necesario el procesamiento de información para conocer la posición en cada momento. Ello implica poseer de alguna manera la información necesaria y aplicarle los procedimiento y algoritmos adecuados para obtener dicha posición. La manera como se obtenga la información requerida determinará el tipo de navegación que está siendo utilizada.

En base a lo anterior se podría intentar una definición para su aplicación aeronáutica:

Navegación Aérea

Es el conjunto de técnicas y procedimientos que permiten conducir eficientemente una aeronave a su lugar de destino, asegurando la integridad de los tripulantes, pasajeros y de los que están en tierra. Se basa en la observación del cielo y del terreno y en los datos aportados por los instrumentos de vuelo.

Si bien durante mucho tiempo el término navegación estuvo asociado esencialmente a barcos, el desarrollo de la aviación le agregó una nueva dimensión: además de la posición horizontal (Latitud y Longitud), se necesita también la altura de la aeronave para garantizar que no se acerca peligrosamente a algún obstáculo. Se habla entonces de navegación 3D (Latitud, Longitud y Altitud (3D)). Finalmente, el gran congestionamiento del espacio aéreo en muchas partes del mundo hace necesario agregar otra variable más: el tiempo. El tener disponible un sistema de navegación que permita mantener sincronizadas las operaciones de las aeronaves facilita el introducir más aeronaves en el mismo espacio aéreo sin comprometer la seguridad. Ésta es la navegación 4D, y está siendo desarrollada actualmente.

La navegación aérea se divide en dos tipos, dependiendo de si la aeronave es independiente o necesita de instalaciones exteriores a la aeronave para poder guiarse:

Navegación Aérea Autónoma

Es aquella que no necesita de alguna infraestructura o información suministrada por un equipo exterior a la aeronave para poder completar con éxito el vuelo. A su vez, ésta se divide en:

Navegación observada: se basa en la observación directa por parte del navegante o piloto de las referencias necesarias en el terreno para conocer la posición de la aeronave.

Navegación a estima (Dead reckoning): el navegante o piloto estima la posición actual, conocidas la dirección y la velocidad respecto al terreno.

Navegación por fijación de la posición: ésta a su vez se subdivide en navegación aérea astronómica, navegación aérea Doppler, navegación aérea inercial (INS = Inertial Navigation System).

Navegación Aérea No Autónoma

necesita de instalaciones exteriores para su guiado durante el vuelo, estas reciben el nombre de *ayudas a la navegación*. Estas ayudas se pueden dividir a su vez dependiendo del tipo de información que transmiten así como del canal a través del cual lo hacen. Así, las ayudas pueden ser:

Ayudas visuales al aterrizaje: son instalaciones que proporcionan señales visuales durante la etapa de aterrizaje de la aeronave.

Radioayudas: Se basan en señales radioeléctricas, usualmente generadas en instalaciones terrestres y recibidas a bordo.

Navegación por satélite: se basa en una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire. Estos permiten determinar las coordenadas geográficas y la altitud de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de dicha constelación.

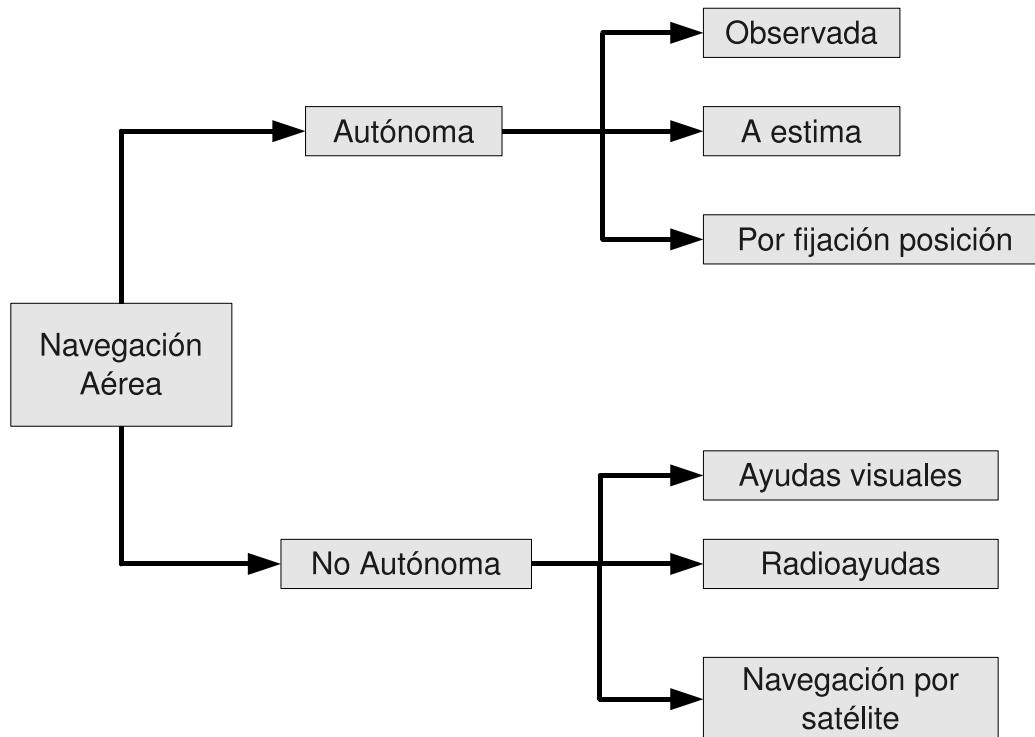


Figura 1: Navegación Aérea

2. Métodos de Navegación Aérea

2.1. Navegación Autónoma

2.1.1. Navegación Observada [1]

Es la que se realiza basándose en referencias del terreno que hay que ver, es una navegación visual. Se trata de que el piloto localice las referencias del terreno, para lo cual es fundamental el uso de buenos mapas en los que vengan reflejados con claridad los accidentes geográficos, los pueblos y ciudades, las carreteras y las vías del ferrocarril, etc. [1]

Para este tipo de navegación se debe preparar el vuelo, estableciendo con toda precisión la ruta que se va a seguir sobre el propio mapa.

En el mismo mapa se marcan puntos en la ruta para dividirla por tramos, tratando de que las marcas coincidan con puntos de referencia de la ruta. Se deben calcular los tramos por kilómetros y tiempo que se tarda en volar de un punto a otro.

Hay que tener buena información meteorológica de toda la ruta y llevar la lista de las frecuencias de Torres y Centros de control. Si se encontrase perdido, basarse en la última posición que se reconoció y calcular la posición probable por el tiempo transcurrido; en esa posición probable tratar de reconocer alguna referencia significativa.



Pues..., donde estamos exactamente?

2.1.2. Navegación a Estima (Dead Reckoning) [2]

Dead reckoning es traducido en español como “*navegación por estima*”, es una expresión derivada del término náutico *deduced reckoning* (cálculo basado en inferencia), y es un procedimiento matemático que utiliza sencillas fórmulas trigonométricas para inferir la ubicación actual de un navío haciendo cálculos basados en el rumbo y la velocidad de navegación a lo largo de un período de tiempo, sin usar el cielo y los astros como referencia.

La amplia mayoría de sistemas de robots móviles terrestres que se usan hoy en día, utilizan la técnica dead reckoning como columna vertebral de su estrategia de navegación, y al igual que sus homólogos náuticos, necesitan eliminar los errores acumulados con continuos ajustes con varios sistemas de ayuda a la navegación.

El principal problema que tiene la navegación a estima es que requiere la selección de una serie de puntos significativos de la ruta que tienen que estar a la vista de la tripulación, aunque en ocasiones estas referencias visuales no se obtienen, especialmente en vuelos nocturnos o con condiciones atmosféricas adversas y en vuelos realizados sobre el mar.

La implementación más simple posible de la técnica dead reckoning es habitualmente llamada *odometría*, término que implica que el desplazamiento de un vehículo a lo largo de la **Trayectoria** se deriva directamente de algún odómetro o contarrevoluciones a bordo del vehículo. Una técnica común para implementar la odometría consiste en utilizar encoders ópticos directamente acoplados a los motores o a los ejes de las ruedas.



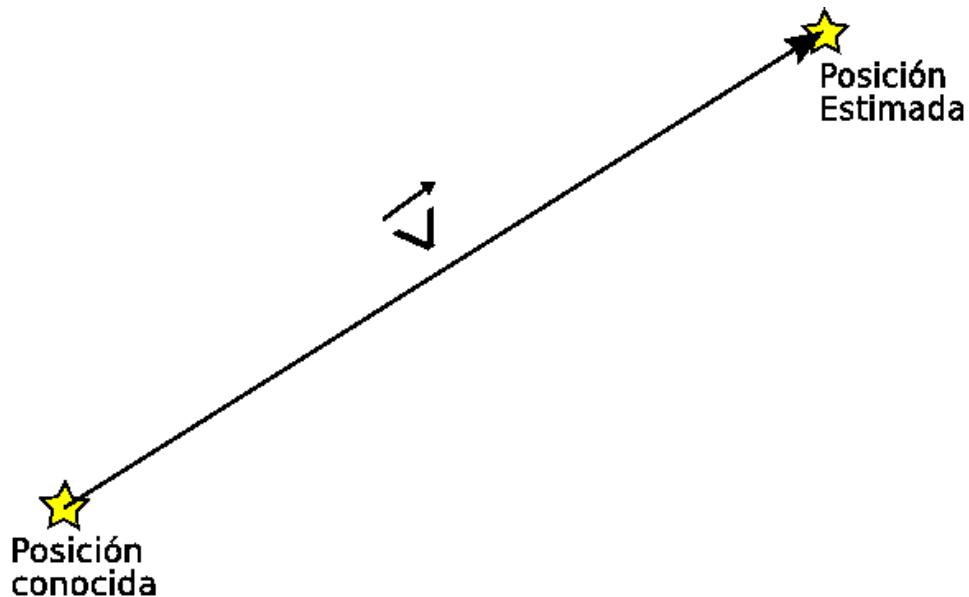


Figura 2: Navegación a estima [2]

Si, dado un marco de referencia arbitrario, las coordenadas de la posición previa conocida P_1 son (x_1, y_1) y las de la nueva posición P_2 son (x_2, y_2) , entonces el vector que une ambas posiciones se puede denotar como \vec{x}_{12} , y en notación vectorial:

$$\vec{x}_{12} = \vec{x}_2 - \vec{x}_1 = (x_2, y_2) - (x_1, y_1) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (1)$$

En forma matricial se expresaría como:

$$\vec{x}_{12} = \vec{x}_2 - \vec{x}_1 = \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Y entonces, la navegación a estima implica que:

$$\vec{x}_2 = \vec{x}_1 + \vec{x}_{12} = \vec{x}_1 + \int_{t_1}^{t_2} \vec{v}_{12} dt = \vec{x}_1 + \int_{t_1}^{t_2} \vec{v} dt \quad (3)$$

Nótese que en la expresión (3) se asume que el vector \vec{x}_{12} es igual a la integración del vector velocidad estimada \vec{v} . Esto no necesariamente es así, debido a que el vector velocidad estimada \vec{v} no necesariamente es igual al vector velocidad real \vec{v}_{12} . Esto en general se debe a:

- Una componente adicional a la velocidad del avión, causada típicamente, por el viento (v_w). La acción del viento, si no está alineada con la velocidad del avión, lo saca de su curso deseado (track).
- Por otra parte, si el viento está alineado, pero en contra, causará una sobre-estimación (overshoot) de la posición (se estimará que la aeronave está más allá de donde realmente está), y si está a favor causará una sub-estimación (undershoot) de la posición.
- Un error del sistema de navegación. Los errores más perniciosos en este sentido son los **errores sistemáticos**, que son aquellos en los que hay un sesgo (o bias) que continuamente altera la medida en una misma dirección (causando, por ejemplo, una desviación constante hacia la derecha de 0.1° por minuto).

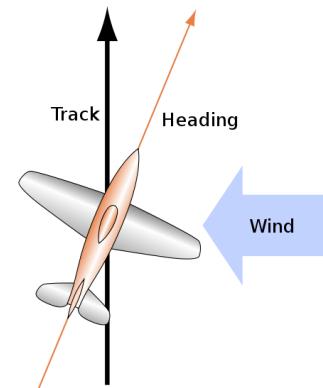


Figura 3: El efecto del viento

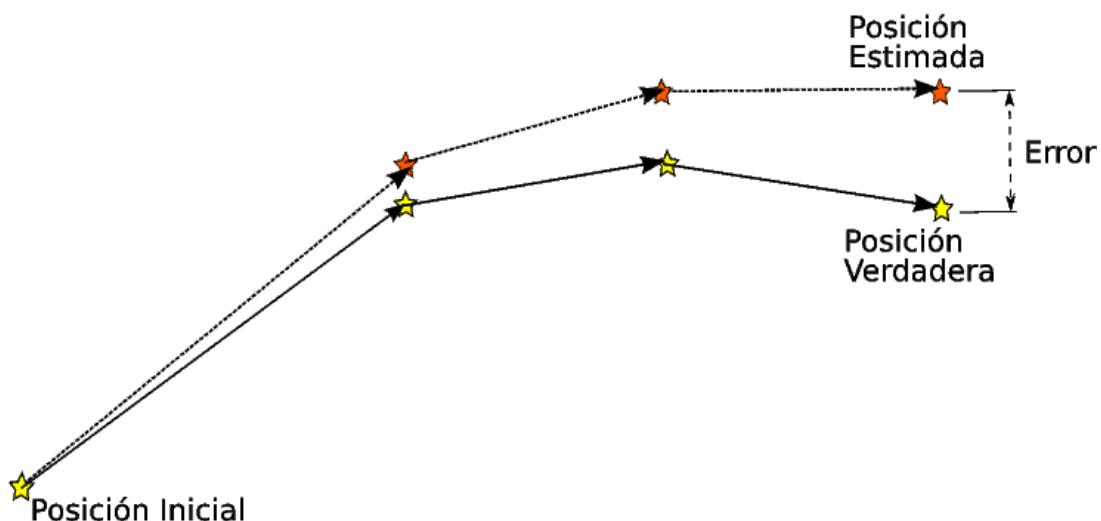


Figura 4: Error acumulativo en la navegación a estima [2]

Debido al proceso de integración implícito en este tipo de navegación, se tiene el inconveniente de que **los errores son acumulativos**, es decir, una pequeña desviación en las estimaciones iniciales de la posición se va convirtiendo con el paso del tiempo en un gran error, tal y como indica la Figura 4.

Es por esta razón que la navegación a estima debe combinarse con otros tipos de navegación (el visual, por ejemplo) para obtener una corrección de la posición que permita empezar una iteración “fresca” del método (es decir, cada cierto tiempo hace falta obtener un corrección confiable).

También es conveniente acotar que la navegación a estima en aeronáutica se usa para conocer la posición en 2D.

2.1.3. Navegación por Fijación de la Posición

Navegación Aérea Astronómica: hace uso de la astronomía para el uso directo del navegante aéreo, que comprende principalmente las coordenadas celestes, el tiempo y la posición y movimiento aparente de los astros con respecto a la Tierra.

Se emplea en vuelos de larga distancia donde se carece de radio ayudas convenientes. Para utilizarla se requiere disponer de sextante, cronómetro, almanaque aéreo y tabla de reducción. La combinación de los diferentes métodos de navegación permite resolver el problema de navegación con mayor facilidad.

Con la evolución y desarrollo de las aeronaves, así como el aumento de la autonomía de vuelo, se hizo patente la necesidad de nuevos sistemas de posicionamiento que permitieran atravesar zonas en las cuales las radio ayudas existentes no llegaban (por ejemplo en el mar). Para superar este problema se echó mano de la navegación marítima, la cual disponía desde muy antiguo de una técnica para establecer la posición de un punto a partir de la observación de los astros. Para ello se utilizaban instrumentos tales como el astrolabio y el sextante. El Astrolabio permite localizar las posiciones de las estrellas sobre la bóveda celeste y se utilizaba para determinar la altura, la posición y el movimiento de los astros sobre el horizonte. Este instrumento, tan antiguo y complejo, tiene además otro tipo de aplicaciones, como son: determinar la hora del día o de la noche, mediante la observación del Sol o de un Astro sobre el horizonte; calcular la hora de salida de las estrellas; así como resolver problemas astrológicos más complejos.

Poco tiempo después se inventó el sextante, que se basa en los mismos principios que el astrolabio pero se vale de dos nuevos elementos: un largavistas y un juego de espejos, cuyo uso de precisión resultaron efectivos después de los estudios sobre óptica. El sextante es un instrumento que permite medir ángulos entre dos objetos tales como dos puntos de una costa o un astro -tradicionalmente el Sol- y el horizonte. Conociendo la elevación del Sol y la hora del día se puede determinar la latitud a la que se encuentra el observador. Esta determinación se efectúa con bastante precisión mediante cálculos matemáticos sencillos de aplicar.

La navegación astronómica jugó un papel de complemento para la navegación a estima y sirvió básicamente para determinar la posición cuando no era posible establecer referencias visuales con el terreno. Esta técnica de realizar periódicamente la fijación de la posición permitió las más importantes proezas registradas en el progreso de la aviación.

Por otra parte, los cálculos a realizar, aún con la utilización de unos métodos muy elaborados, exigían una dedicación que no era compatible con la atención que la tripulación había de destinar al control de la aeronave en vuelo. Esta situación supuso la aparición del navegante como miembro adicional de la tripulación, capaz de establecer varias veces la posición del avión basándose en la observación con sextante, de determinados cuerpos celestes y el empleo de almanaques que indicaban su posición en las diferentes épocas del año.

Navegación Aérea Doppler: es un sistema de radar, el cual suministra a la tripulación, con alto grado de precisión, la velocidad y el ángulo de desviación (deriva) durante el vuelo a la vez que suministra datos visuales (lecturas) en millas náuticas, que lo separan del destino y millas que lo alejan a la izquierda o a la derecha del curso preseleccionado.

El sistema opera continua y automáticamente sin la ayuda de estaciones de tierra. Fue diseñado utilizando el **Efecto Doppler**¹; recordando el mismo principio físico de comportamiento de



Figura 5: Las Pléyades

¹ El **Efecto Doppler** es llamado así por el austriaco Christian Doppler consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels ("Sobre

un objeto que se aproxima y se aleja: “Que la frecuencia de una señal observada a un punto fijo en el espacio es mayor que la observada en una fuente de señal, si la fuente está en movimiento hacia el punto fijo.” Recíprocamente, la frecuencia en el punto fijo será menor entonces que en la fuente, si la fuente se está moviendo lejos del punto fijo.

Este aumento o disminución en frecuencia es proporcional a la velocidad a la cual la fuente de señal se está moviendo y si ésta es constantemente monitoreada y medida por algunos medios de precisión, la información obtenida puede ser usada para determinar el curso y la velocidad de la misma fuente de señal.

En este caso, la fuente de señal en el avión es el mismo sistema DOPPLER y es este sistema igualmente el que constantemente monitorea y mide la señal, la cual es reflejada en la superficie terrestre.

Usualmente se instalan dos sistemas en un avión y consiste de una antena (usada para ambos sistemas), un TRANSECTOR (transmisor - receptor), una unidad seguidora (Tracker), un panel de control, un computador (no como lo conocemos actualmente), un controlador del computador y un indicador.

Cada sistema recibe información de rumbo de uno de los dos sistemas de compás y suministra al sistema de piloto automático información de cualquiera de los sistemas DOPPLER.

Ambos sistemas operan simultáneamente y separadamente aunque reciben señales de información de una antena común.

Navegación Aérea Inercial [2]: consiste en una plataforma estabilizada con giróscopos que sirve como marco de referencia. En la misma unos acelerómetros y giróscopos permiten medir los cambios de velocidad (tanto translacional como rotacional) y, mediante integración sucesiva de los datos, obtener la posición de la aeronave y su Actitud.

En realidad se está llevando a cabo un sofisticado proceso de dead reckoning y que, debido a que la plataforma giro-estabilizada no es perfecta, en los cálculos se van introduciendo errores acumulativos que deben ser corregidos mediante fuentes externas al cabo de un cierto tiempo de vuelo.

Dicho tiempo es variable según la calidad del INS utilizado, un sistema de buena calidad acumula un error en distancia de un kilómetro o menos por hora, y el error angular típicamente es menor a pocas décimas de grado por hora.

2.2. Navegación Aérea No Autónoma

2.2.1. Ayudas visuales

Utilizadas casi desde los inicios mismos de la aviación, por lo general están asociadas a la operación de aterrizaje:

De punto fijo Permiten identificar fácilmente desde lo lejos un punto de referencia importante. El faro aeronáutico es el ejemplo típico.

De dirección Proporcionan al piloto información valiosa sobre la dirección de, por ejemplo, el viento (manga de viento) o el eje de la pista (luces de eje de pista).

el color de la luz en estrellas binarias y otros astros”).

De elevación En este caso se indica al piloto el ángulo vertical con el que se aproxima a la pista. Entran en esta categoría los sistemas de luces PAPI (ver Figura 6(a)), VASI, etc.

En la Figura 6(a) se muestra el típico emplazamiento de un sistema PAPI.

2.2.2. Radioayudas

Las radioayudas se pueden clasificar según el tipo de información que proporcionan:

Dirección a un punto fijo Este tipo de ayudas simplemente indica, mediante una aguja, la dirección en la que tendría que volar el piloto para llegar a un punto de referencia dado. A este tipo pertenece el sistema ADF/NDB.

Azimutales El azimut es el ángulo horizontal formado entre un eje de referencia (por ejemplo el vector radioayuda norte magnético), y el vector radioayuda aeronave. En esta clasificación entran, entre otros, el VOR y el ILS/LLZ. Usar una radioayuda azimutal a menudo se denomina navegación theta (θ), por la notación que recibe habitualmente el ángulo proporcionado (azimut).

Cenitales En este caso se proporciona el ángulo vertical entre el eje de referencia radioayuda-horizonte y el vector radioayuda-aeronave. El ILS/GS es el ejemplo típico.

De distancia Este tipo de ayudas proporcionan la distancia entre radioayuda y aeronave. Como esta distancia a menudo se denota como “rho” (ρ), se habla entonces de navegación rho. A esta categoría pertenece el DME.

En la Figura 6(b) se presenta la vista aérea de una estación VOR en Bélgica.



(a) Precision Approach Path Indicator -
PAPI [3]



(b) Vista aérea de un VOR [3]

Figura 6: Ayudas visuales

2.2.3. Navegación por satélite

Los últimos avances en la tecnología espacial están generando una revolución en la manera como se realiza la navegación. De hecho, se estima que antes del 2020 los sistemas basados en navegación por satélite sustituirán a casi todos los demás sistemas utilizados actualmente.

Estos sistemas reciben el nombre genérico de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) porque su cobertura es mundial. Los representantes más importantes son:

GPS Sistema estadounidense de origen militar, es actualmente el más conocido y desarrollado.

Empezó a operar a principios de la década de 1980 y se están ejecutando planes para su modernización. En 1957 la Unión Soviética lanzó al espacio el satélite Sputnik I, que era monitorizado mediante la observación del Efecto Doppler de la señal que transmitía. Debido a este hecho, se comenzó a pensar que, de igual modo, la posición de un observador podría ser establecida mediante el estudio de la frecuencia Doppler de una señal transmitida por un satélite cuya órbita estuviera determinada con precisión. La Armada estadounidense rápidamente aplicó esta tecnología, para proveer a los sistemas de navegación de sus flotas de observaciones de posiciones actualizadas y precisas. Así surgió el sistema TRANSIT, que quedó operativo en 1964, y hacia 1967 estuvo disponible, además, para uso comercial. Las actualizaciones de posición, en ese entonces, se encontraban disponibles cada 40 minutos y el observador debía permanecer casi estático para poder obtener información adecuada. Posteriormente, en esa misma década y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, portando cada uno de ellos uno de estos relojes y estando todos sincronizados con base en una referencia de tiempo determinada. En 1973 se combinaron los programas de la Armada y el de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (este último consistente en una técnica de transmisión codificada que proveía datos precisos usando una señal modulada con un código de ruido pseudo-aleatorio (PRN = Pseudo-Random Noise), en lo que se conoció como Navigation Technology Program, posteriormente renombrado como NAVSTAR GPS. Entre 1978 y 1985 se desarrollaron y lanzaron once satélites prototipo experimentales NAVSTAR, a los que siguieron otras generaciones de satélites, hasta completar la constelación actual, a la que se declaró con «capacidad operacional inicial» en diciembre de 1993 y con «capacidad operacional total» en abril de 1995. En 1994, este país ofreció el servicio normalizado de determinación de la posición para apoyar las necesidades de la OACI, y ésta aceptó el ofrecimiento.

GLONASS La respuesta soviética al GPS, con las dificultades económicas de la ex-URSS cayó a niveles de inoperatividad. Sin embargo, hay planes de reactivarlo gracias a la ayuda de la Unión Europea.

Los tres primeros satélites fueron colocados en órbita en octubre de 1982. El sistema fue pensado para ser funcional en el año 1991, pero la constelación no fue terminada hasta diciembre de 1995 y comenzó a ser operativo el 18 de enero de 1996. Ese mismo año la ya Federación Rusa ofreció el canal de exactitud normalizada (CSA) del GLONASS para apoyar las necesidades de la OACI, y ésta aceptó el ofrecimiento.

La situación económica de Rusia a partir de 1990 supuso que en abril de 2002 sólo 8 satélites estuvieran completamente operativos.

En el 2004, 11 satélites se encontraban en pleno funcionamiento. A fines de 2007 son 19 los satélites operativos. Son necesarios 18 satélites para dar servicio a todo el territorio ruso y 24 para poder estar disponible el sistema en todo el mundo.

En 2007, Rusia anunció que a partir de ese año se eliminan todas las restricciones de precisión en el uso de GLONASS, permitiendo así un uso comercial ilimitado. Hasta ahora las restricciones de precisión para usos civiles eran de 30 m.

La aparición en el mercado de receptores que permiten recibir señales pertenecientes a los dos sistemas GLONASS y GPS (con sistemas de referencia diferentes) hace interesante las posibilidades de GLONASS en la medición como apoyo al GPS norteamericano.

GALILEO Es el futuro sistema GNSS, totalmente civil, actualmente en desarrollo por parte de la Unión Europea. Poseerá características que lo harán mucho más avanzado que el GPS. Inicialmente Galileo iba a estar disponible en el 2008 aunque el proyecto acumula ya tres años de retraso y no podrá comercializar sus primeros servicios hasta 2011, entre temores de que esa fecha pueda demorarse hasta 2014, entre otros motivos, por disensiones entre los países participantes.

El 28 de diciembre de 2005 se lanzó el satélite Giove-A (Galileo in-orbit validation element), primero de este sistema de localización por satélite, desde el cosmódromo de Baikonur, en Kazajistán. El segundo de los satélites de prueba, el Giove-B debería haberse lanzado en abril de 2006, pero por problemas con el ordenador a bordo, el lanzamiento fue retrasado hasta el pasado 25 de abril de 2008, teniendo lugar desde el mismo cosmódromo.

En abril de 2004 entró en funcionamiento el sistema EGNOS, un sistema de apoyo al GPS para mejorar la precisión de las localizaciones. En otras regiones del mundo hay otros sistemas similares compatibles con EGNOS: WAAS de Estados Unidos, MSAS de Japón y el GAGAN de la India.

Las fases establecidas para la implementación del sistema son:

- Definición (2000-2003)
- Desarrollo y validación en órbita (2004-2008)
- Despliegue (2008-2010)
- Explotación comercial (a partir de 2010 - 2015)

La República Popular China (RPC) es, desde el 9 de octubre de 2004, el primer país no europeo que participa en el programa Galileo, tras la firma del acuerdo en Pekín por la, en ese momento, vicepresidenta de la Comisión Europea, Loyola de Palacio.

China aportará 200 millones de euros del total de 3.200 millones del proyecto pese a las reticencias de algunos miembros europeos por transferir tecnología a China. En julio de 2005 la UE firmó contratos con varias compañías chinas para desarrollar aplicaciones comerciales para Galileo.

Se ha firmado ya un acuerdo con Israel y con India (septiembre de 2005), y se está en conversaciones con Brasil, Japón, Corea del Sur, Australia y Ucrania.

Es muy importante acotar que en la actualidad ninguno de los sistemas GNSS operativos pueden utilizarse, por sí solo, como método único de navegación aérea. Hay varias causas para esto:

- Tanto el sistema GPS como el GLONASS son de naturaleza militar y no hay garantía de que operen continuamente para los usuarios civiles (GALILEO se encuentra aun en fase de desarrollo).



(a) Satélite GPS generación IIF [3]



(b) Satélite GLONASS



(c) Satélite GALILEO

Figura 7: Navegación por satélite

- Ninguno de los sistemas GNSS proporciona, actualmente, integridad. Es decir, la garantía de que el piloto recibirá rápidamente y de manera automática la advertencia de que el sistema tiene una falla y dejó de funcionar adecuadamente.
- No hay garantía o cobertura de fiabilidad proveída por sus operadores (e.g. accidentes aereos)
- La fiabilidad es incierta en regiones de altas latitudes del norte de Europa
- La precisión es moderada para aplicaciones que requieren una rápida determinación de la posición
- A los usuarios no se les informa inmediatamente de los errores que ocurren en el sistema

Es por esta razón que se han desarrollado sistemas adicionales a los GNSS que los complementan. Éstos son los llamados **Sistemas de Aumento** y existen básicamente tres categorías:

SBAS Sistemas de aumento basados en satélites. Proporcionan satélites auxiliares y estaciones de referencia en tierra con funciones específicas que complementan a los GNSS y los hacen aptos para navegación en ruta y aproximaciones a la pista. Los ejemplos son WAAS (estadounidense), EGNOS (europeo) y MSAS (japonés).

GBAS Sistemas de aumento basados sólo en instalaciones en tierra. El ejemplo típico es el LAAS (aún en desarrollo), son de corto alcance y están enfocados en la asistencia en el aterrizaje.

ABAS Sistemas de aumento basados en instrumentos a bordo de la aeronave. Combinan información de varios instrumentos aeronáuticos y en función de esto monitorizan el estado de los satélites GNSS.

3. Métodos para determinar la posición [2]

Adicionalmente al método dead reckoning, existen varias maneras de obtener la posición según la naturaleza de las ayudas de navegación disponibles para el aeronavegante.

3.1. Método $\theta - \theta$

Este método se utiliza cuando se tienen disponibles varias radioayudas de tipo azimutal, o en general, cuando el sistema de navegación obtiene ángulos entre ejes de referencia, puntos de referencia y la posición actual.

Para explicar los fundamentos del método, se debe imaginar que el sistema de navegación de la aeronave obtiene el ángulo θ_1 entre la posición de la aeronave, el punto de referencia P_1 y un eje de referencia, tal y como ilustra la Figura 8(a). Si el punto de referencia es, por ejemplo, una estación VOR, el eje de referencia apunta al norte magnético.

El conocimiento del ángulo θ_1 determina una línea de posición (o LOP, por sus siglas en inglés). Se sabe entonces que la aeronave se encuentra en algún lugar a lo largo de LOP_1 : la línea que empieza en el punto P_1 y se aleja de dicho punto en la dirección θ_1 .

Si se toma un marco de referencia rectangular de origen cualquiera, con su eje Y paralelo al eje de referencia hacia el norte de la radioayuda, y se supone que las coordenadas del punto P_1 en dicho sistema vienen dadas por (x_1, y_1) , entonces se tiene una situación como la mostrada en la Figura 8(b).

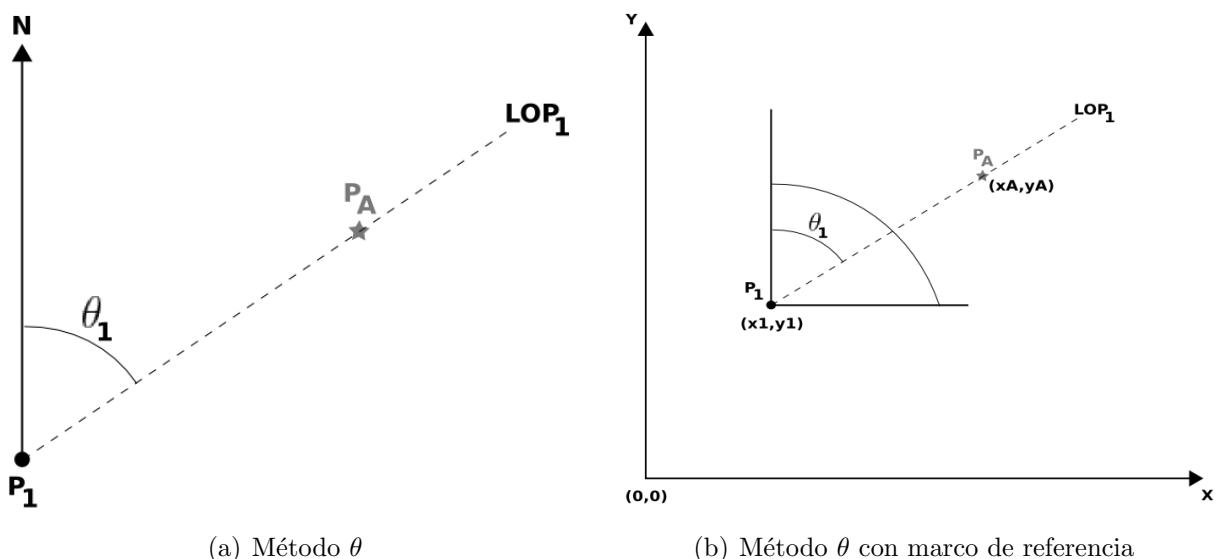


Figura 8: Método $\theta - \theta$

Entonces, se puede demostrar que la posición (x_A, y_A) de la aeronave es posible expresarla de manera simple como la ecuación de una recta:

$$y_A = \tan(90 - \theta_1)(x_A - x_1) + y_1 \quad (4)$$

Sin embargo esta información, aunque muy útil, es insuficiente para determinar la posición exacta de la aeronave: existe un número infinito de posiciones que cumple con la condición establecida por la LOP_1 (Ecuación 4). Está claro que se tiene una única ecuación y que existen dos incógnitas. Es por ello que se dice que hay una ambigüedad en la posición. Para resolverla, es necesario obtener información adicional. Hablando en términos matemáticos, es necesario encontrar otra ecuación que no sea linealmente dependiente de la primera.

Ahora bien, si dentro del alcance del sistema de navegación de la aeronave se encuentra otra estación VOR P_2 que proporcione una segunda medición θ_2 , la situación será la planteada en la Figura 9.

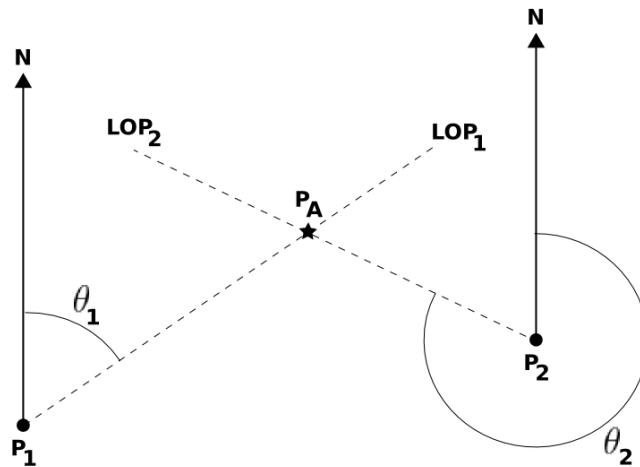


Figura 9: Theta-theta fix

En este caso, se tiene una segunda línea de posición LOP_2 , que al intersectarse con LOP_1 proporcionará la posición de la aeronave. La Ecuación (5) representa a LOP_2 .

$$y_A = \tan(90 - \theta_2)(x_A - x_2) + y_2 \quad (5)$$

Las Ecuaciones (4) y (5) se combinan entonces para resolver el sistema y obtener la posición. Obviamente, en las consideraciones anteriores se ha supuesto que las coordenadas de los puntos P_1 y P_2 eran conocidas (de allí que se les considere puntos de referencia). Por lo general, esto supone que dichos puntos están en lugares fijos. No obstante, pudiera darse el caso de que dichos puntos fueran móviles, y entonces el sistema de navegación debería tener información suficiente para calcular la posición de los puntos de referencia en cada instante (como se hace, por ejemplo, con los satélites de los sistemas GNSS).

3.2. Método $\theta - \rho$

En ocasiones, junto con el VOR puede existir una estación DME colocalizada^{1.4} en el punto P_1 . En este caso, además de un ángulo θ_1 se tiene una distancia o rango ρ_1 , como indica la Figura 10(a). Como puede verse, hay dos líneas de posición: LOP_1 correspondiente al ángulo θ_1 y LOP_2 , que corresponde al rango ρ_1 (de hecho, está “línea de posición” es en realidad una circunferencia, pero el concepto se mantiene). En la intersección entre ambas LOPs se encuentra la aeronave.

La ecuación que corresponde a LOP_2 se puede expresar como:

$$(y_A - y_1)^2 + (x_A - x_1)^2 = \rho_1^2$$

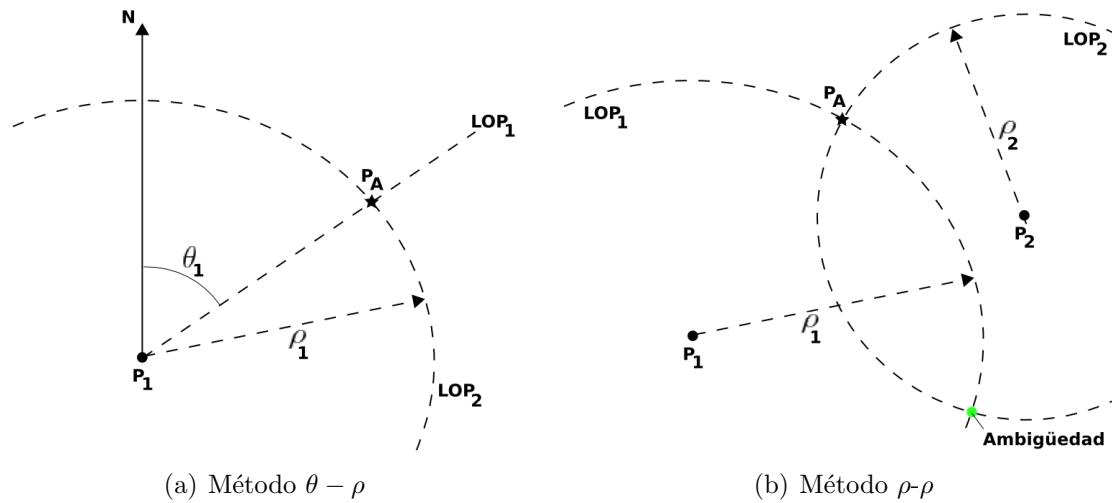


Figura 10: Métodos de navegación

Note que este sistema puede resolverse incluso si el VOR y el DME no están en el mismo lugar. Asimismo, es posible que la LOP de ρ constante intersecte a la LOP de θ constante en más de un lugar, dando como resultado una ambigüedad que deba resolverse con información adicional.

3.3. Método $\rho-\rho$

En este caso, se tienen al menos dos radioayudas que proporcionan información de distancia, como se indica en la Figura 10(b).

Se puede ver con facilidad la aparición de una ambigüedad en la parte inferior de la Figura 10(b). Las fuentes de información adicional usadas habitualmente para resolver dicha ambigüedad son:

- Agregar mediciones (ecuaciones) adicionales (de ρ o θ) que permitan discernir la posición correcta.
- Dado que la aeronave despega de una posición conocida, un registro cuidadoso de la ruta seguida puede permitir discriminar cuál es la posición correcta. Esto significa que se está utilizando información adicional del pasado (en vez del presente) para resolver la ambigüedad.
- Para vehículos terrestres y acuáticos, a veces es posible utilizar información sobre el entorno para resolver la ambigüedad. Por ejemplo, el sistema de navegación de un barco puede descartar una ambigüedad que caiga en tierra, y el de un coche podría eliminar todas las posiciones posibles que caigan fuera de calles y carreteras.

3.4. Método hiperbólico

El método hiperbólico es una versión del $\rho-\rho$, pero en vez de utilizar los rangos absolutos se utiliza la diferencia entre ellos. Variaciones del método usan la diferencia entre fases, o tiempos de recepción, como muestran los diversos sistemas de navegación que utilizaban este método, como el Omega, el LORAN, el Decca, etc.

El uso de la diferencia entre rangos genera LOPs que son hipérbolas, como muestra la Figura 11.

Note que en la Figura 11 la ambigüedad queda resuelta al generar la hipérbola entre los puntos P_2 y P_3 .

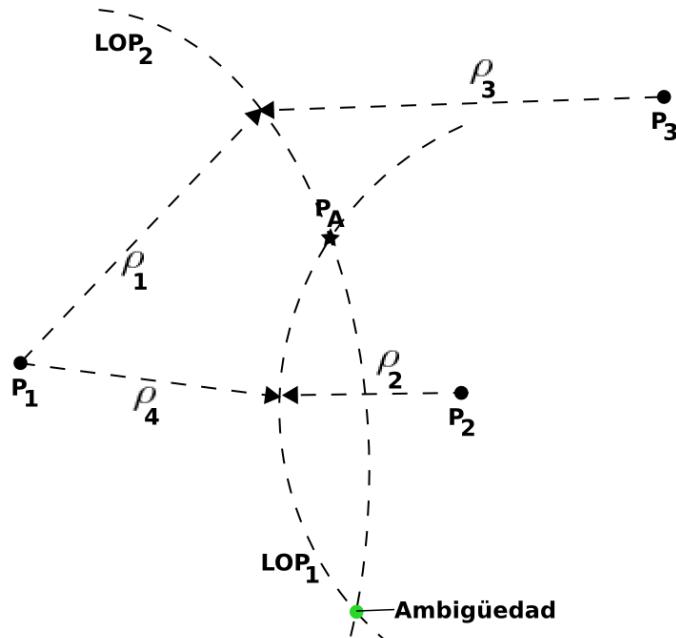


Figura 11: Método hiperbólico

4. La Tierra

4.1. Forma, tamaño y movimientos

Desde el punto de la navegación, el planeta Tierra se considera una esfera perfecta, aunque en la realidad no lo sea. Inspecciones detalladas de su superficie han determinado variaciones en altura de, aproximadamente, 19 km desde el fondo del océano hasta el vértice de la montaña más alta, Figura 12(a).

Medida en el ecuador, el diámetro de la Tierra es aproximadamente 12756,274 km, mientras que el diámetro polar es de 12713,505 km. La diferencia entre estos diámetros es de 42,769 km y, este valor, puede ser utilizado para expresar la elipticidad de la Tierra (Figuras 12(c) y 12(b)). El radio entre esta diferencia y el diámetro ecuatorial es:

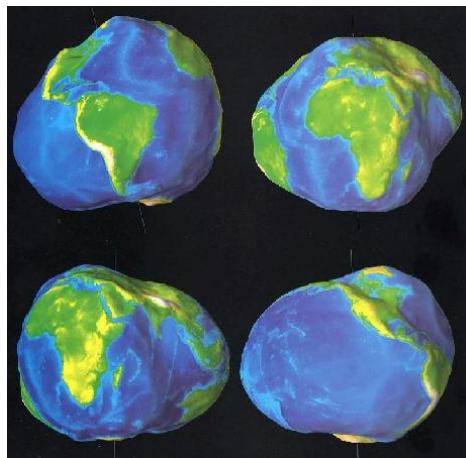
$$\text{Elipticidad} = \frac{42,769 \text{ m}}{12756,274 \text{ m}} = \frac{1}{298,257}$$

Dado que el diámetro ecuatorial excede al polar en 1 parte sobre 298, se considera que la Tierra es, prácticamente, esférica.

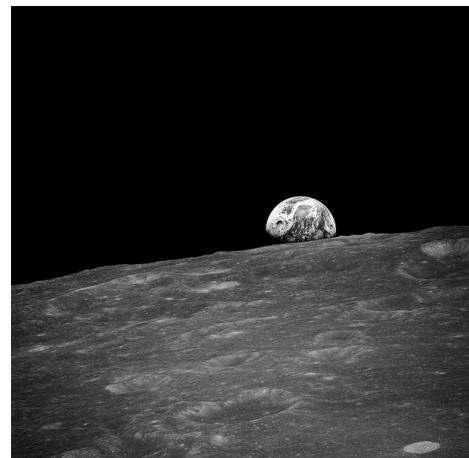
La Tierra tiene los siguientes movimientos al desplazarse en el espacio:

- **Movimiento de rotación:** Es un movimiento que efectúa la Tierra girando sobre sí misma a lo largo de un eje ideal denominado Eje terrestre que pasa por sus polos. Una vuelta completa, tomando como referencia a las estrellas, dura 23 horas con 56 minutos y 4 segundos y se denomina día sidéreo. Si tomamos como referencia al Sol, el mismo meridiano pasa frente a nuestra estrella cada 24 horas, llamado día solar. Los 3 minutos y 56 segundos de diferencia se deben a que en ese plazo de tiempo la Tierra ha avanzado en su órbita y debe de girar algo más que un día sideral para completar un día solar, Figura 12(d).

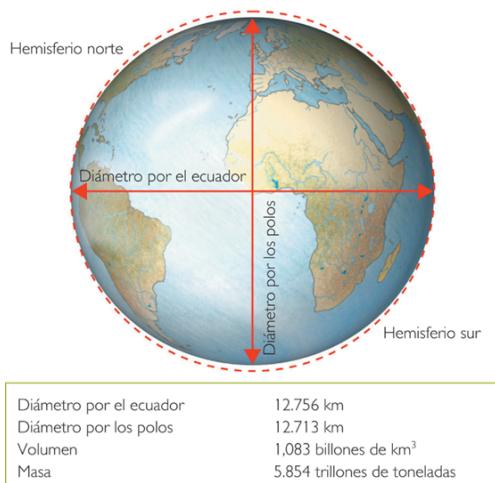
La primera referencia tomada por el hombre fue el Sol, cuyo movimiento aparente, originado en la rotación de la Tierra, determina el día y la noche, dando la impresión que el cielo gira



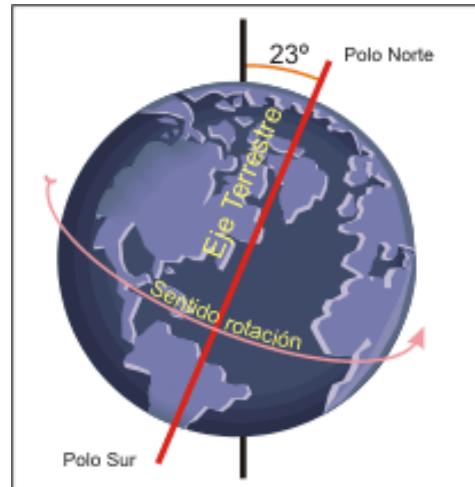
(a) Forma de la tierra, dimensiones exactas generadas



(b) Amanecer de la Tierra, misión Apolo 8 (1968)



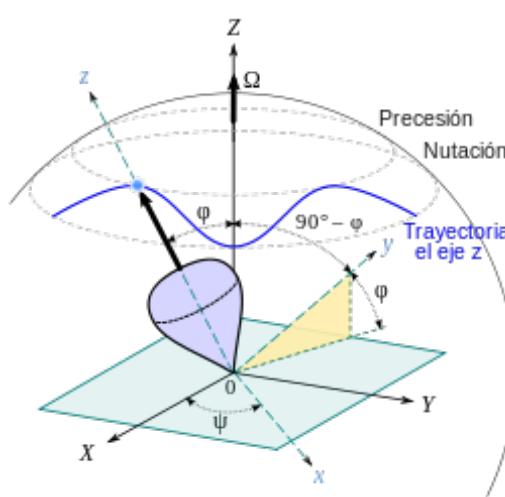
(c) Dimensiones



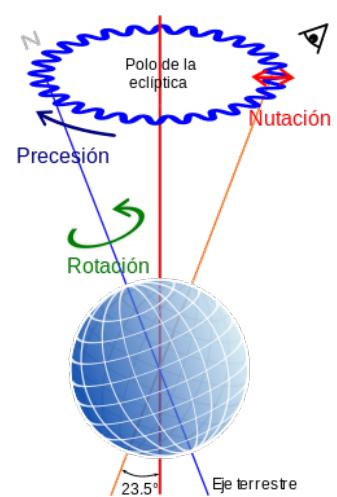
(d) Rotación



(e) Precesión



(f) Nutación



(g) Los movimientos principales

Figura 12: La Tierra

alrededor del planeta. En el uso coloquial del lenguaje se utiliza la palabra día para designar este fenómeno, que en astronomía se refiere como día solar y se corresponde con el tiempo solar.

El eje terrestre forma un ángulo de $23,5^{\circ}$ respecto a la normal de la eclíptica, fenómeno denominado oblicuidad de la eclíptica. Esta inclinación produce largos meses de luz y oscuridad en los polos geográficos, además de ser la causa de las estaciones del año, causadas por el cambio del ángulo de incidencia de la radiación solar.

- **Movimiento de traslación:** Es un movimiento por el cual la Tierra se mueve alrededor del Sol. La causa de este movimiento es la acción de la gravedad, originándose cambios que, al igual que el día, permiten la medición del tiempo. Tomando como referencia el Sol, resulta lo que se denomina año tropical, lapso necesario para que se repitan las estaciones del año. Dura 365 días, 5 horas y 47 minutos. El movimiento que describe es una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros, a una distancia media del Sol de prácticamente 150 millones de kilómetros ó 1 U.A. (Unidad Astronómica). De esto se deduce que la Tierra se desplaza con una rapidez media de 106200 km/h (29,5 km/s).

La trayectoria u órbita terrestre es elíptica. El Sol ocupa uno de los focos de la elipse y, debido a la excentricidad de la órbita, la distancia entre el Sol y la Tierra varía a lo largo del año. A primeros días de enero se alcanza la máxima proximidad al Sol, produciéndose el perihelio, donde la distancia es de 147,5 millones de km.; mientras que en los primeros días de julio se alcanza la máxima lejanía, denominado afelio, donde la distancia es de 152,6 millones de km.

- **Movimiento de precesión:** también denominado precesión de los equinoccios, es debido a que la Tierra no es esférica, sino un elipsoide achatado por los polos. Si la Tierra fuera totalmente esférica, sólo realizaría los movimientos anteriormente descritos, Figura 12(e).

Una vuelta completa de precesión dura 25767 años, ciclo que se denomina año platónico, cuya duración había sido estimada por los antiguos mayas.

- **Movimiento de nutación:** debido al achatamiento de los polos y a la atracción de la Luna sobre el eje ecuatorial. También es un movimiento de vaivén y se produce durante el movimiento de precesión, este recorre a su vez una pequeña elipse (como si fuese una pequeña vibración). Una vuelta completa a la elipse suponen 18,6 años, lo que supone que en una vuelta completa de precesión la Tierra habrá realizado 1385 bucles, Figura 12(f).

- **Bamboleo de Chandler:** pequeña oscilación del eje de rotación de la tierra que añade 0,7 segundos de arco en un período de 433 días a la precesión de los equinoccios. Fue descubierto por el astrónomo norteamericano Seth Carlo Chandler en 1891, y actualmente no se conocen las causas que lo producen, aunque se han propuesto varias teorías (fluctuaciones climáticas causantes de cambios en la distribución de la masa atmosférica, posibles movimientos geofísicos bajo la corteza terrestre, etc.)

4.2. Coordenadas geográficas

El sistema de coordenadas geográficas determina todas las posiciones de la superficie terrestre utilizando las dos coordenadas angulares de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con el eje de rotación de la Tierra. Este define dos ángulos medidos desde el centro de la Tierra:

- **Latitud:** mide el ángulo entre cualquier punto y el ecuador. Las líneas de latitud se llaman paralelos y son círculos paralelos al ecuador en la superficie de la Tierra.

La insolación terrestre depende de la latitud. Dada la distancia que nos separa del Sol, los rayos luminosos que llegan hasta nosotros son prácticamente paralelos. La inclinación con que estos rayos inciden sobre la superficie de la Tierra es, pues, variable según la latitud. En la zona intertropical, a mediodía, caen casi verticales, mientras que inciden tanto más inclinados cuanto más se asciende en latitud, es decir cuanto más nos acercamos a los Polos. Así se explica el contraste entre las regiones polares, muy frías y las tropicales, muy cálidas.

- **Longitud:** mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Se acepta que Greenwich en Londres es la longitud 0 en la mayoría de las sociedades modernas. Las líneas de longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos.

Combinando estos dos ángulos, se puede expresar la posición de cualquier punto de la superficie de la Tierra. Por ejemplo, El Cairo, en Egipto, tiene latitud 30 grados norte, y longitud 31 grados este. Así un vector dibujado desde el centro de la tierra al punto 30 grados norte del ecuador y 31 grados al este de Greenwich pasará por El Cairo.

El ecuador es un elemento importante de este sistema de coordenadas; representa el cero de los ángulos de latitud y el punto medio entre los polos. Es el plano fundamental del sistema de coordenadas geográficas.

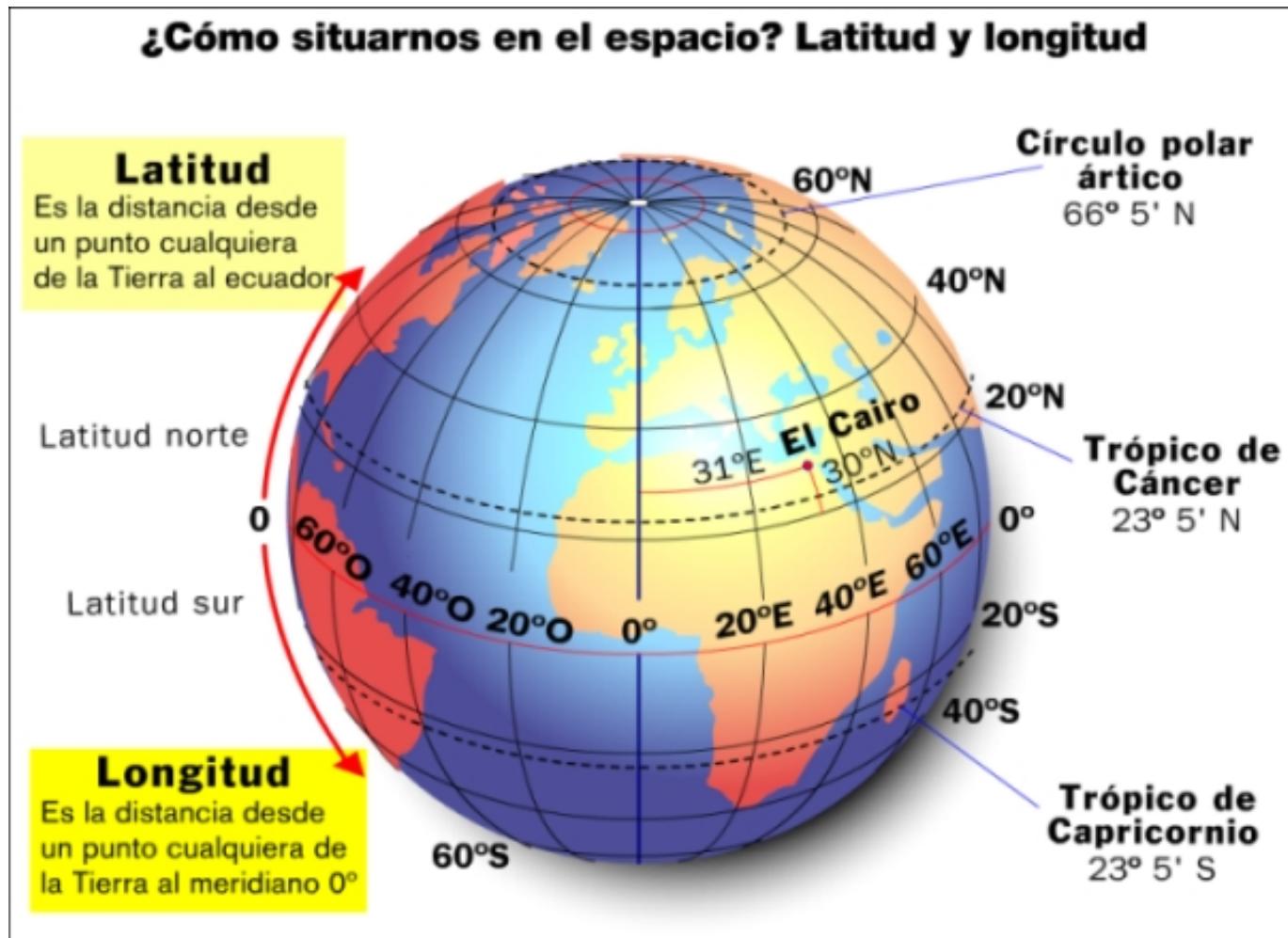


Figura 13: Latitud y longitud

El **Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator** (Universal Transverse Mercator, UTM) está basado en un tipo de Proyección cartográfica denominada *proyección geográfica transversal de Mercator*, tangente a un meridiano. Las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros al nivel del mar, que es la base de la proyección del elipsoide de referencia.

El sistema de coordenadas UTM fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en la década de 1940. El sistema se basó en un modelo elipsoidal de la Tierra. Se usó el elipsoide de Clarke de 1866 para el territorio de los 48 estados contiguos. Para el resto del mundo –incluidos Alaska y Hawái– se usó el Elipsoide Internacional. Actualmente se usa el elipsoide WGS84 como modelo de base para el sistema de coordenadas UTM.

Anteriormente al desarrollo del sistema de coordenadas UTM varios países europeos ya habían experimentado la utilidad de mapas cuadriculados, en proyección conforme, al cartografiar sus territorios en el período de entreguerras. El cálculo de distancias entre dos puntos con esos mapas sobre el terreno se hacía más fácil usando el teorema de Pitágoras, al contrario que con las fórmulas trigonométricas que había que emplear con los mapas referenciados en longitud y latitud. En los años de post-guerra estos conceptos se extendieron al sistema de coordenadas basado en las proyecciones Universal Transversa de Mercator y Estereográfica Polar Universal, que es un sistema cartográfico mundial basado en cuadrícula recta.

La proyección transversa de Mercator es una variante de la proyección de Mercator que fue desarrollada por el geógrafo flamenco Gerardus Mercator en 1569. Esta proyección es conforme, es decir, que conserva los ángulos y casi no distorsiona las formas pero inevitablemente sí lo hace con distancias y áreas. El sistema UTM implica el uso de escalas no lineales para las coordenadas X e Y (longitud y latitud cartográficas) para asegurar que el mapa proyectado resulte conforme.

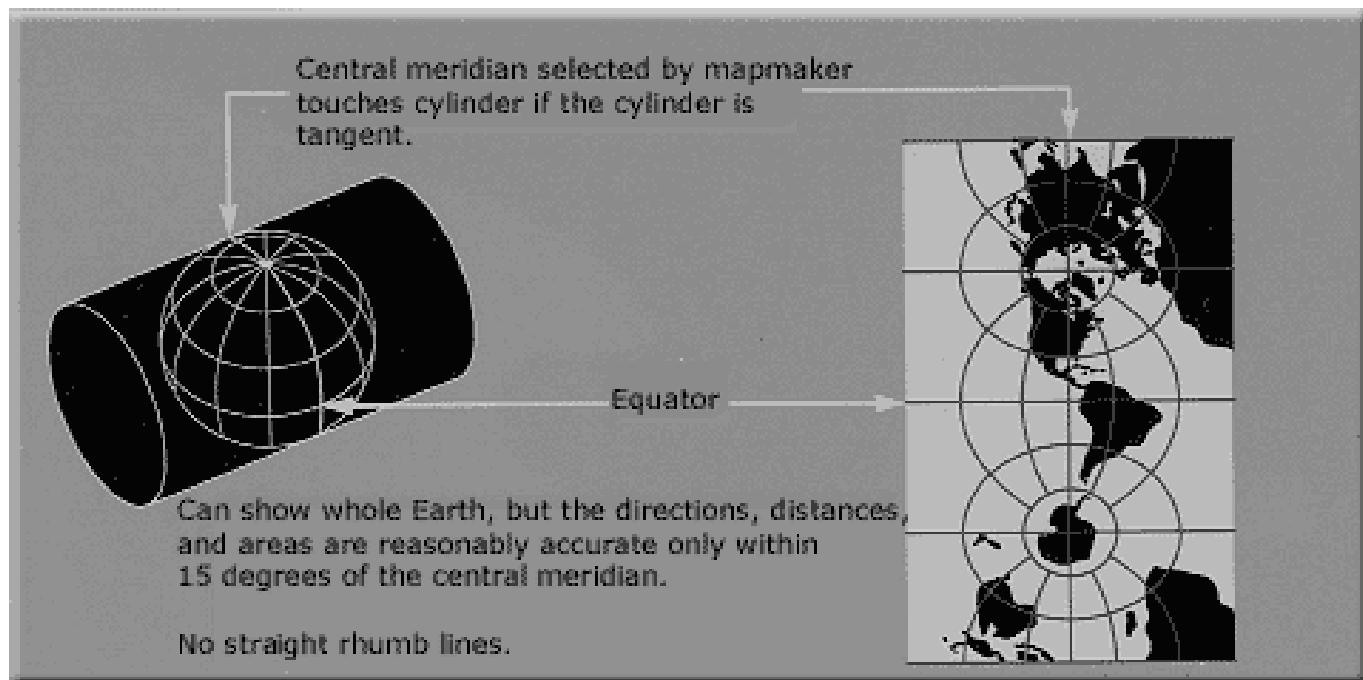


Figura 14: Sistema de proyección transversa Mercator

La UTM es una proyección cilíndrica conforme. El factor de escala en la dirección del paralelo y en la dirección del meridiano son iguales ($h = k$). Las líneas loxodrómicas se representan como líneas rectas sobre el mapa. Los meridianos se proyectan sobre el plano con una separación proporcional a la del modelo, así hay equidistancia entre ellos. Sin embargo los paralelos se van separando a medida

que nos alejamos del Ecuador, por lo que al llegar al polo las deformaciones serán infinitas. Por eso sólo se representa la región entre los paralelos 84°N y 80°S. Además es una proyección compuesta; la esfera se representa en trozos, no entera. Para ello se divide la Tierra en husos de 6° de longitud cada uno, mediante el artificio de Tyson .

La proyección UTM tiene la ventaja de que ningún punto está demasiado alejado del meridiano central de su zona, por lo que las distorsiones son pequeñas. Pero esto se consigue al coste de la discontinuidad: un punto en el límite de la zona se proyecta en coordenadas distintas propias de cada Huso.

Para evitar estas discontinuidades, a veces se extienden las zonas, para que el meridiano tangente sea el mismo. Esto permite mapas continuos casi compatibles con los estándar. Sin embargo, en los límites de esas zonas, las distorsiones son mayores que en las zonas estándar.

- **Husos UTM:** Se divide la Tierra en 60 husos de 6° de longitud, la zona de proyección de la UTM se define entre los paralelos 80° S y 84° N. Cada huso se numera con un número entre el 1 y el 60, estando el primer huso limitado entre las longitudes 180° y 174° W y centrado en el meridiano 177° W. Cada huso tiene asignado un meridiano central, que es donde se sitúa el origen de coordenadas, junto con el ecuador. Los husos se numeran en orden ascendente hacia el este. Por ejemplo, la Península Ibérica está situada en los husos 29, 30 y 31, y Canarias está situada en el huso 28. En el sistema de coordenadas geográfico las longitudes se representan tradicionalmente con valores que van desde los -180° hasta casi 180° (intervalo -180° → 0° → 180°); el valor de longitud 180° se corresponde con el valor -180°, pues ambos son el mismo
- **Bandas UTM:** Se divide la Tierra en 20 bandas de 8° Grados de Latitud, que se denominan con letras desde la C hasta la X excluyendo las letras Íz .°”, por su parecido con los números uno (1) y cero (0), respectivamente. Puesto que es un sistema norteamericano (estadounidense), tampoco se utiliza la letra ”Ñ”. La zona C coincide con el intervalo de latitudes que va desde 80° Sur (o -80° latitud) hasta 72° S (o -72° latitud). Las bandas polares no están consideradas en este sistema de referencia. Para definir un punto en cualquiera de los polos, se usa el sistema de coordenadas UPS. Si una banda tiene una letra igual o mayor que la N, la banda está en el hemisferio norte, mientras que está en el sur si su letra es menor que la ”N”.
- **Notación:** Cada cuadrícula UTM se define mediante el número del huso y la letra de la zona; por ejemplo, la Plaza España en la ciudad de Córdoba (Argentina) se encuentra en las coordenadas:

- latitud:31° 25' 43.38"S
- longitud:64° 11' 5.84"W

las cuales corresponden a las UTM 20J (6523614, 387522), ver Figura 15.

- **Excepciones:** La rejilla es regular salvo en 2 zonas, ambas en el hemisferio norte; la primera es la zona 32V, que contiene el suroeste de Noruega; esta zona fue extendida para que abarcase también la costa occidental de este país, a costa de la zona 31V, que fue acortada. La segunda excepción se encuentra aún más al norte, en la zona que se conoce como Svalbard (ver mapa para notar las diferencias).

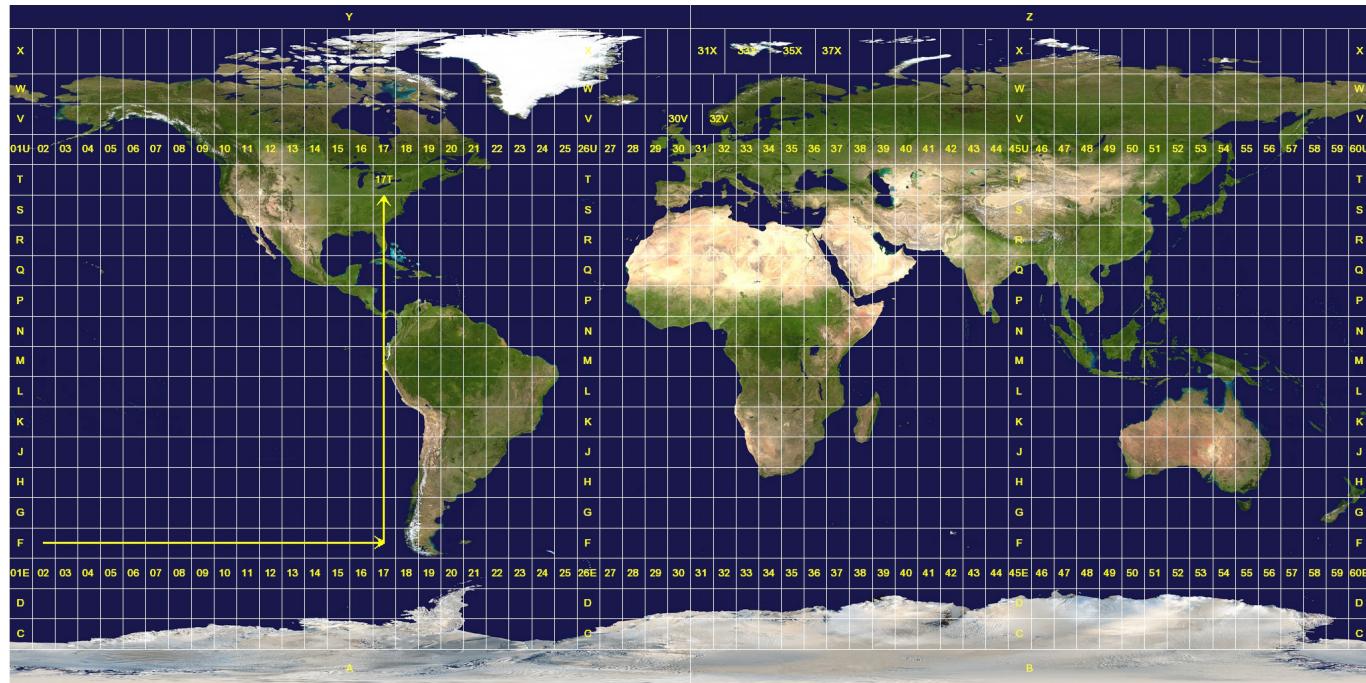


Figura 15: Zonas UTM

5. Distancia, dirección, tiempo, el Norte

5.1. Distancia

La distancia se mide como la longitud de la línea que une a dos puntos, su unidad habitual para el uso en navegación es la *Milla náutica* (NM), la cual se define como 1 minuto de latitud o 6076 pies (1852 m). A veces es necesario convertir de NM a Milla estatutaria (SM) y viceversa, lo cual se hace de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Millas estatutarias}}{\text{Millas náuticas}} = \frac{76}{66}$$

Relacionado con el concepto de distancia se encuentra el de *velocidad*, el cual indica la tasa de cambio de posición. La velocidad se expresa usualmente en millas por hora (mph). Si la medida de la distancia es en NM, entonces la velocidad se expresa en Nudo. Una velocidad de 200 nudos es igual a una velocidad de 200 NM por hora.

Para calcular la distancia entre puntos sobre la superficie terrestre es necesario tener en cuenta no es plana, lo que implica que existirán ligeras (o grandes) distorsiones si se realiza esta operación sobre un mapa (dependiendo del tipo de este ultimo).

Además, el hecho de que la Tierra sea un geoide introduce variaciones adicionales, que deberán (o no) tenerse en cuenta dependiendo de la precisión con que se desee realizar la medición.

A los fines de una primera aproximación, puede asumirse que la Tierra es esférica.

Entre dos puntos cualesquiera de la superficie terrestre pueden trazarse líneas curvas diferentes: la ortodrómica, la loxodrómica.

Loxodrómica (del griego λοξός “oblicuo” y δρόμος “carrera, curso”) a la línea que une dos puntos cualesquiera de la superficie terrestre cortando a todos los meridianos con el mismo ángulo, ver Figura 16(a). La loxodrómica, por tanto, es fácil de seguir manteniendo el mismo rumbo

marcado por la brújula. Su representación en el mapa dependerá del tipo de proyección del mismo, por ejemplo en la de Mercator es una recta.

Ortodrómica (del griego *ενθεία* “recto” y *δρόμος* “carrera”) es el camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre; es el arco del círculo máximo que los une, menor de 180 grados, Figura 16(b).

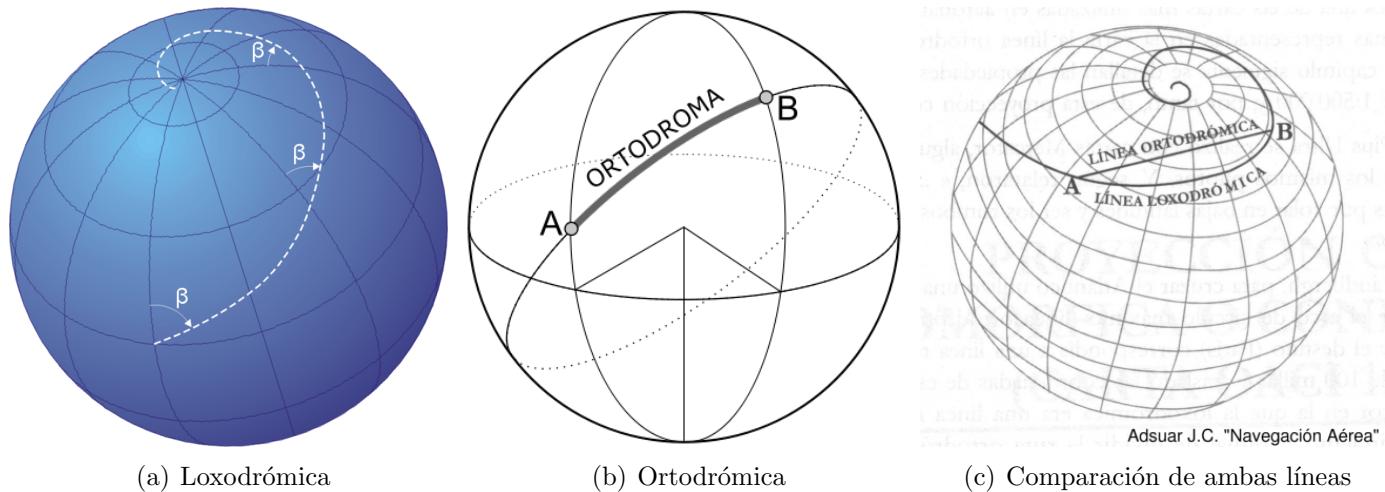


Figura 16: Distancia entre dos puntos sobre la Tierra

Pedro Nunes, un geógrafo portugués, publicó en Tratado de la navegación (1546) un descubrimiento con grandes implicaciones para la navegación. Antes de él se creía que, marchando sobre la superficie terrestre con un rumbo fijo, es decir, formando un ángulo constante con la meridiana, la línea recorrida era un círculo máximo. Dicho con otras palabras, que un navío que siguiese este derrotero daría la vuelta al mundo y volvería al punto de partida. Nunes señaló la falsedad de este concepto al demostrar que la curva recorrida se va acercando al polo, alrededor del cual da infinitas vueltas, sin llegar nunca a él; o, dicho en lenguaje técnico, que tiene el polo por punto asintótico.

Una característica de la ortodrómica es que presenta un ángulo diferente con cada meridiano, (excepto cuando dicha ortodrómica coincide con un meridiano o con el ecuador). Esta característica representó un grave inconveniente para la navegación, solucionado hacia los últimos años del Siglo XX con el sistema GPS, porque antes del mismo, era difícil trazar una ruta de navegación que siguiera la ortodrómica ya que obligaría a continuos cambios de rumbo. Cuando las distancias eran grandes y seguir el camino más corto suponía un ahorro significativo, se realizaba una aproximación marcando una serie de puntos intermedios, en los cuales se cambiaba de rumbo, y de ésta manera se lograba una aproximación a las correspondientes loxodrómicas.

5.2. Dirección

La dirección es la posición de un punto en el espacio relativo a otro sin referencia a la distancia entre ellos. En la navegación se utiliza un sistema numérico para indicar la dirección como el mostrado en la Figura 17(a). En la misma se divide la vista en planta en 360° , comenzando con el norte a 000° y continuando en sentido de las agujas del reloj, pasando por el este a 90° , sur 180° y oeste 270° , volviendo al norte.

Este círculo se denomina rosa de compás, las líneas quasi-verticales de la Figura 17(a) son meridianos. Por el punto A pasa el meridiano a través de 000° y 180° de la rosa, el punto B se encuentra en una dirección de 60° respecto del A y el punto C en una dirección de 220° del punto A.

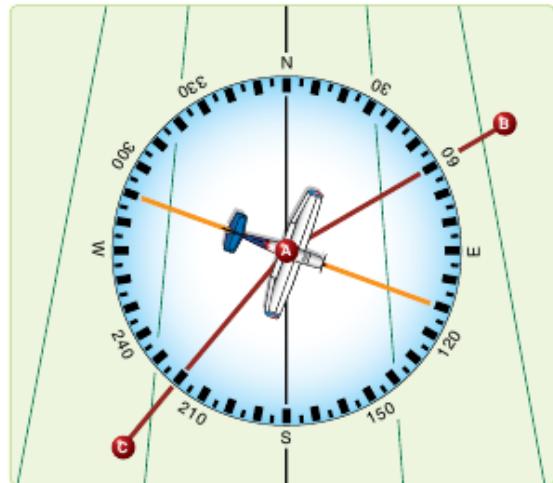
5.2.1. Definiciones

Trayectoria (trajectory) se define como el conjunto de puntos del espacio por los cuales pasa la aeronave durante su vuelo (ver Figura 17(b)).

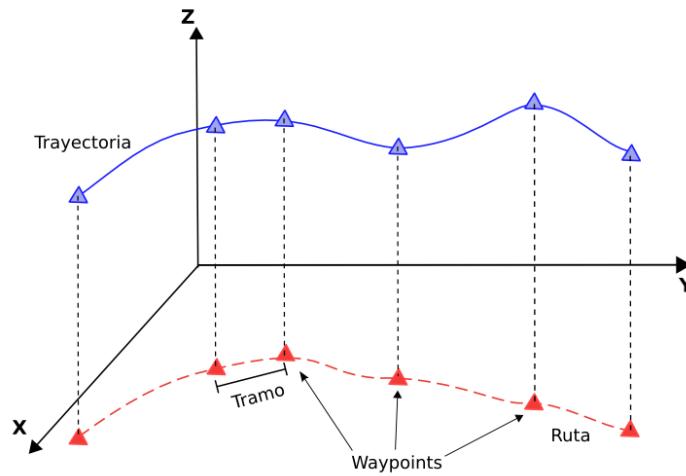
Ruta es la curva resultante de proyectar la trayectoria sobre la superficie de la Tierra (ver Figura 17(b)).

Waypoints son puntos conocidos a lo largo de la ruta, y a menudo resaltan por alguna razón en particular (Lugares de reporte obligatorio, puntos de intersección de aerovías, etc.) (ver Figura 17(b)).

Tramo (leg) se define como un segmento de ruta comprendido entre dos waypoints (ver Figura 17(b)).



(a) Rosa de compás



(b) Trayectoria, ruta

Figura 17: Elementos de navegación

Rumbo el rumbo o o “Heading” (HDG) es el ángulo entre el norte y el eje longitudinal de la aeronave (hacia donde apunta su nariz). No coincide necesariamente con el vector velocidad (Track) dado que es posible, por ejemplo, que el piloto modifique el rumbo para contrarestar un viento cruzado (ver Figura 18(a)).

Curso deseado es el ángulo entre el norte (cualquiera que se esté usando: magnético, geográfico, etc) y la línea recta que une dos waypoints sucesivos en la ruta. En inglés se denomina “*Desired Track*”, y se abrevia DTK (ver Figura 18(a)).

Derrota En náutica, la derrota es el trayecto que ha recorrido una embarcación desde un punto “A” hasta otro punto “B”. En el derrotero o carta náutica se traza la ruta a seguir; contiene informaciones importantes para el navegante, tales como ubicación de faros, boyas, profundidad

del agua, etc. En navegación aérea es el ángulo entre el norte y la línea tangente a la ruta (dicha tangente corresponde, por cierto, al vector velocidad de la aeronave). En inglés se le llama “*Track*” o TK (ver Figura 18(a)).

Error transversal El error transversal o “*Cross-Track Error*” (XTE) es la distancia perpendicular entre la posición de la aeronave y la línea que representa al curso deseado.²

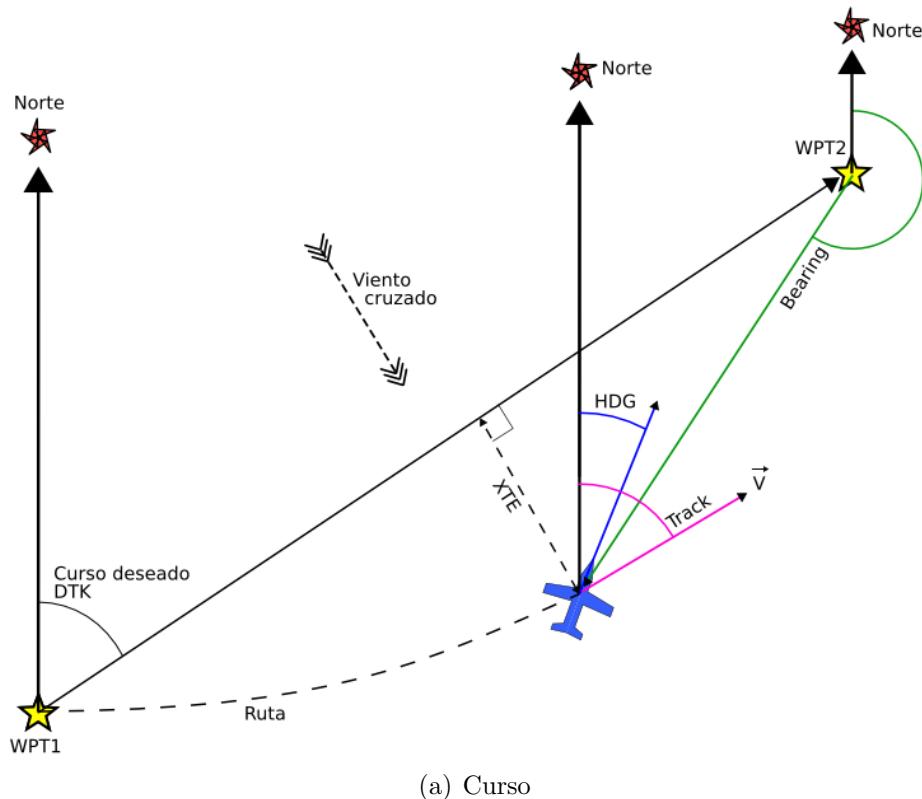


Figura 18: Elementos de navegación (continuación)

5.3. Tiempo

La navegación aérea es un problema de cuatro dimensiones: latitud, longitud, altura y es necesario saber *en qué momento* estuvimos (o estaremos) en una posición dada.

Muchos de los sistemas de navegación modernos están basados en la medición de intervalos de tiempo. La medición del tiempo se encuentra asociada a la historia del calendario, esto es, un modo sistemático de organizar los días en semanas, meses, años y milenios.

Una de las formas más sencillas es con referencia a las fases de la Luna, el calendario de este tipo es denominado *lunar* y el tiempo entre repeticiones de una fase dada de la Luna (p.e., luna nueva) es denominado *mes sinódico*. Este dura, en promedio, 29,530589 días.

El calendario lunar tiene como ventaja que posee una referencia muy fácil de seguir, pero tiene como inconveniente que el mes sinódico no tiene un número entero de días.

²Es conveniente tener en cuenta que la diferencia entre el curso deseado (DTK) y la ruta realmente seguida (TK) por lo general es producida por factores externos tales como el viento cruzado (en el caso de las aeronaves) o las corrientes marinas (si se habla de barcos).

Por otra parte, las estaciones del año son fenómenos muy importantes para la vida humana, pero las fases de la Luna son independientes de estas. Por ese motivo algunas culturas prefirieron marcar el paso del tiempo siguiendo el movimiento aparente del Sol por el cielo (eclíptica³). Este calendario se denomina *solar*, y el tiempo transcurrido entre dos pasos suscesivos del Sol por el equinoccio de primavera es denominado *a no vernal equinoctial* y tiene una duración de 365,2424 días.

Se comprobó que 19 años vernales equinoxiales equivalen a 234,997 meses sinódicos (≈ 235), lo que implica que cada 19 años las fases de la Luna y sus fenómenos asociados (eclipses) caen casi exactamente en la misma fecha. Este ciclo es denominado *metónico* en honor al astrónomo Metón, siglo V a. C.

Posteriormente los romanos establecieron un calendario que, tras sucesivas adaptaciones, evolucionó al calendario actualmente utilizado en el hemisferio occidental, el calendario Gregoriano.

La medición del tiempo tiene, actualmente, dos familias:

- Las asociadas al movimiento de los cuerpos celestes
- Las basadas en las oscilaciones de los átomos

5.3.1. Tiempo solar

El tiempo solar es una medida del tiempo fundamentada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar. Toma como origen el instante en el cual el Sol pasa por el Meridiano, que es su punto más alto en el cielo, denominado mediodía.¹ A partir de este instante se van contando las horas en intervalos de 24 partes hasta que completan el ciclo diurno.

Sin embargo, el Sol no tiene un movimiento regular a lo largo del año, y por esta razón el tiempo solar se divide en dos categorías:

- **Tiempo solar verdadero** está basado en el día solar verdadero, el cual es el intervalo entre dos regresos sucesivos del Sol al meridiano. Puede ser medido con un reloj de sol, y se corresponde con el amanecer, el mediodía o el anochecer: se basa en lo que es posible observar de manera directa. Con un reloj de sol adecuadamente orientado se puede marcar este tiempo, Figura 19(a).

³El movimiento que realiza la Tierra en torno al Sol (traslación), genera un plano al que se le ha dado el nombre de Eclíptica. Como el eje de giro de la Tierra tiene una inclinación promedio de $23^\circ 27'$, entonces el Ecuador terrestre y la eclíptica forman entre si, este mismo ángulo.

La proyección de la Eclíptica sobre la Esfera Celeste, forma un círculo máximo que se encuentra inclinado con respecto a ella, $23^\circ 27'$.

La incidencia perpendicular de los haces de luz solar, barren casi 47° (exactamente $46^\circ 54'$) sobre el globo terráqueo. Cuando inciden a $23^\circ 27'$ Latitud Norte, alcanzan el denominado Trópico de Cáncer (21 de Junio). Cuando inciden a $23^\circ 27'$ Latitud Sur, el Trópico de Capricornio. Estos son los puntos máximos y mínimos que alcanzará el Sol en su desplazamiento imaginario por el cielo. Estos puntos reciben el nombre de Solsticios, del latín Solstitium, que significan "el Sol más lejos". Los nombres de los Trópicos están determinados por las constelaciones de Cáncer, en el Hemisferio Norte de la Esfera Celeste y de Capricornio, en el Sur.

De manera similar, existen dos puntos en donde se interceptan el Ecuador Celeste y la Eclíptica. Estos son el Punto Vernal ubicado en la constelación de Los Peces (Piscis) y el Punto Otoñal (d) ubicado en la constelación de La Virgen (Virgo). El Punto Vernal representa en las coordenadas celestes lo que el Meridiano de Greenwich en las coordenadas terrestres, es decir el punto origen de las coordenadas celestes.

En estos dos puntos, los haces de luz solar inciden perpendicularmente sobre el Ecuador de la Tierra, iluminando de manera uniforme a todo el planeta. Estos puntos reciben el nombre de Equinoccios, del latín Aequus Nox, que significa "igual duración de las noches". En su recorrido anual, la Tierra alcanza estos puntos el 21 de marzo y 21 de Septiembre, respectivamente.

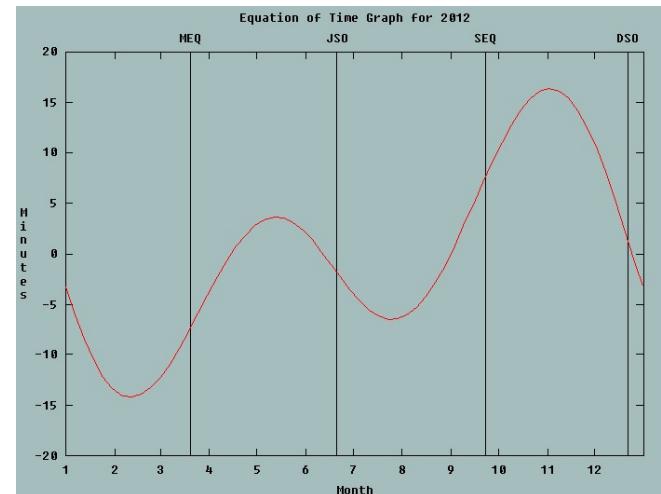
La duración de un día solar verdadero varía a lo largo del año. Esto se debe a que la órbita terrestre es una elipse, con lo cual la Tierra en su movimiento de traslación se mueve más veloz cuando se acerca al Sol y más despacio cuando se aleja de él. Debido a esto, el día solar más corto es el 15 de septiembre, mientras que el día solar más largo es el 22 de diciembre, tanto el Hemisferio Norte como en el Hemisferio Sur.

- **Tiempo solar medio** está basado en un sol ficticio que viaja a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir el día solar medio (24 horas u 86400 segundos). Se corresponde con el tiempo civil y se coordina mediante el Tiempo Medio de Greenwich.

La diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio, que en ocasiones llega a ser de 15 minutos, es llamada *Ecuación de tiempo*, Figura 19(b).



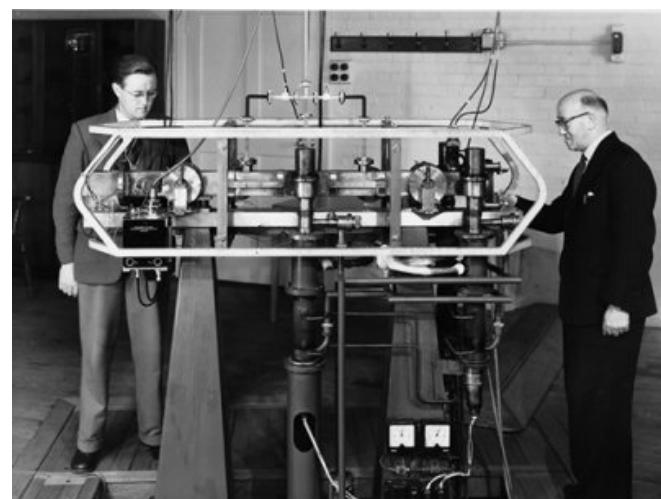
(a) Reloj de sol



(b) Ecuación del tiempo, año 2012



(c) Meridiano de Greenwich



(d) Primer reloj atómico (1948)

Figura 19: Medición del tiempo

5.3.2. Greenwich Mean Time

El Greenwich Mean Time (GMT) es una escala de tiempo basada en el paso del Sol Medio por el meridiano de Greenwich (específicamente por el viejo Observatorio Real de Greenwich, que es el punto de referencia). Este tiempo está obsoleto pues en 1928 la Unión Astronómica Internacional introdujo el Universal Time (UT) para reemplazarlo.

5.3.3. Tiempo Universal (UT)

El UT reemplazó al GMT puesto que este último se basaba en la medición de la posición del Sol, y existen problemas asociados a la medición precisa de la misma.

El UT se basa en la medición de la posición de referencias astronómicas, como los cuásares, consiguiéndose mayor precisión.

A pesar de su mayor precisión el UT sigue siendo una escala de tiempo no uniforme, pues en el fondo se basa en la medición del período de rotación del planeta y éste presenta anomalías. De hecho, en 1956 el Comité Internacional de Pesos y Medidas decidió que la definición del segundo se haría en función del período de revolución de la Tierra para una época dada, y así el segundo de efemérides fue definido como:

La fracción $1/31556925,9747$ del año tropical medio para el 1ro. de Enero de 1900 a las 12 horas.

Debido a la existencia de las mencionadas anomalías, existen varios tipos de UT:

UT0: Es el Tiempo Universal definido mediante observaciones de puntos de referencia astronómicos.

Inicialmente era medido mediante relojes de péndulo, pero conforme la tecnología de los relojes fue avanzando, se notó la existencia de errores.

UT1: Cuando a UT0 se le aplican las correcciones debidas al movimiento de los polos (efecto Chandler y otros) obtenemos UT1. Esta escala es la más ampliamente utilizada por los astrónomos y a menudo el término UT se refiere a ella.

UT2: Debido a que la velocidad de rotación de la Tierra no es constante, UT1 presenta variaciones estacionales relacionadas, entre otras cosas, a las mareas y el intercambio de energía entre la Tierra y la atmósfera. Al aplicar las correcciones debidas a las variaciones más fuertes y regulares (del orden de 3 milisegundos por día), obtenemos UT2. Esta escala, la más precisa para el Tiempo Universal, sigue siendo irregular y por ello ha caído en desuso después de la aparición de nuevos métodos no astronómicos para la medición del tiempo.

5.3.4. Temps Atomique International (TAI)

Dado que las escalas de tiempo anteriores no eran suficientemente regulares, se desarrollaron relojes cada vez más precisos que permitieron desligarse de la rotación de la Tierra como patrón que definía el tiempo. Estas investigaciones desembocaron en el reloj atómico, que marca el tiempo examinando el comportamiento de los átomos de un material dado, y por tanto la escala de tiempo así construida no depende (o depende muy poco) de factores externos.

Desde mediados de 1950 se empezaron a desarrollar relojes atómicos suficientemente precisos y por ello la 13ra. Conferencia General de Pesos y Medidas celebrada en el año 1967 pudo definir el segundo del Sistema Internacional como:

La duración de 9192631770 períodos de la onda de la radiación emitida por el átomo de Cesio 133 cuando se realiza la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo.

En función de esta definición, la BIPM (Oficina Internacional de Pesos y Medidas), localizada en París, Francia, coordina y promedia los datos provenientes de un gran número de relojes atómicos alrededor del globo para generar una escala de tiempo uniforme llamada TAI (Tiempo Atómico Internacional).

5.3.5. Tiempo Universal Coordinado (UTC)

El UTC es una escala de tiempo atómica internacional ampliamente utilizada en el ámbito civil. De hecho, hoy en día prácticamente todos los países del mundo definen sus horas locales en función de UTC6.9, añadiendo o restando un número entero de horas según convenga a su localización geográfica. En cierta forma, UTC puede verse como la manera de reconciliar el tiempo atómico (TAI) con el tiempo dado por la rotación de la Tierra (Tiempo Universal #1 - UT1).

UTC tiene la misma frecuencia del TAI pero cada cierto tiempo se le añaden (o sustraen) segundos extras (llamados “leap seconds”) para mantenerlo sincronizado dentro de +/- 0,9 s de UT1. De esta manera, se obtiene la exactitud del tiempo atómico sin divorciarse completamente del fenómeno de la rotación terrestre.

Los “leap seconds” empezaron a usarse el 30 de Junio de 19726.10, y habitualmente se introducen al final del último minuto del último día de diciembre o del último día de junio, si hace falta. Hasta el momento6.11 se han introducido 33 s (todos ellos de retraso).

5.3.6. Tiempo GPS (GPST)

También llamado GPST, el tiempo GPS es el utilizado como referencia para las aplicaciones relacionadas con el sistema de posicionamiento global por satélite del Departamento de Defensa de los EE.UU.

El GPST es un tiempo de naturaleza atómica que no es alterado por “leap seconds”. Toma como época de origen las 00:00 UTC de la noche del 5 al 6 de enero de 1980. Dado que para esa fecha se habían introducido 19 “leap seconds”, la siguiente expresión es válida:

$$\text{TAI} - \text{GPST} = 19 \text{ s}$$

Un concepto adicional importante es la llamada semana GPS. Ésta empieza la noche del sábado al domingo, de modo tal que el 17 de marzo del 2004 correspondió a la semana GPS 1262. Las semanas GPS tienen un ciclo de 1024, y el primer ciclo se alcanzó en la noche del 21 al 22 de Agosto de 1999, llamado “GPS Week Rollover”.

5.3.7. Tiempo Loran-C

Los transmisores pertenecientes a la cadena (o “chain”, en inglés) Loran poseen relojes atómicos que están sincronizados entre sí. Estos relojes no son alterados por “leap seconds”, lo que hace que se separe progresivamente de UTC.

La época de inicio de los relojes atómicos del sistema Loran-C fue las 0h del 01/Ene/1958.

5.4. El Norte

El concepto de “Norte” engloba una serie de definiciones que es necesario conocer y diferenciar adecuadamente:

- **Norte geográfico:** Es el que viene dado por la intersección del eje de rotación de la Tierra con la superficie de la misma [1]. Es llamado también “Norte verdadero”, y en él confluyen todos los meridianos.

- **Norte magnético:** Es el punto donde la mayor parte de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre entran en la superficie. Se puede detectar utilizando instrumentos tales como la brújula y la "flux valve" (equivalente a la brújula en las aeronaves modernas).

Es importante hacer notar que el norte geográfico y el magnético **NO coinciden**, y que además el norte magnético cambia su posición con el tiempo.

- **Declinación magnética:** Es el ángulo de desviación entre las posiciones del norte magnético y geográfico, vistas desde un punto en particular. Se denota como D y se considera positiva cuando el ángulo medido está hacia el Este del norte verdadero, y negativo en caso contrario.

Lo anterior significa que si sobre un punto de la superficie terrestre la brújula marca un rumbo de 115° , y sabemos que la declinación magnética en ese punto es 4° E, el rumbo verdadero serán 119° .

En la Figura 20 se representa la declinación magnética para dos puntos diferentes de la superficie terrestre. Note que en uno de ellos la geometría es tal que la declinación es cero.

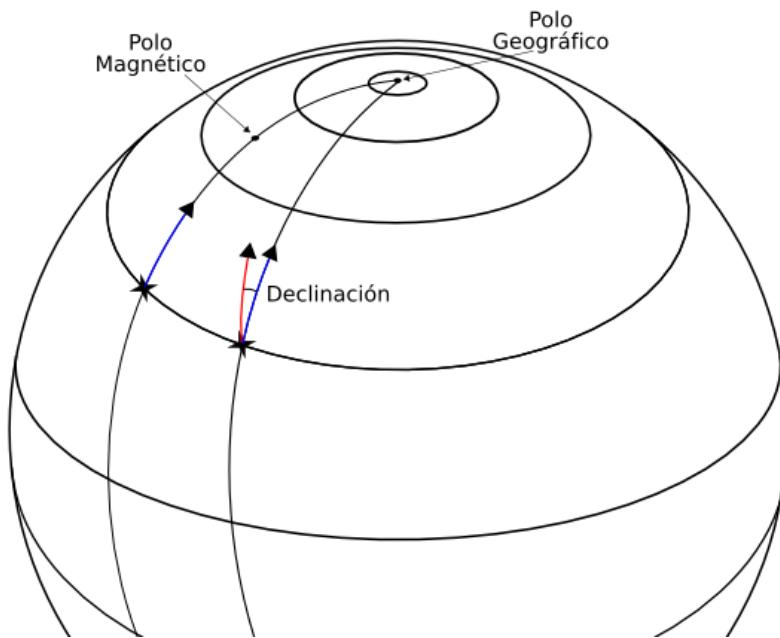
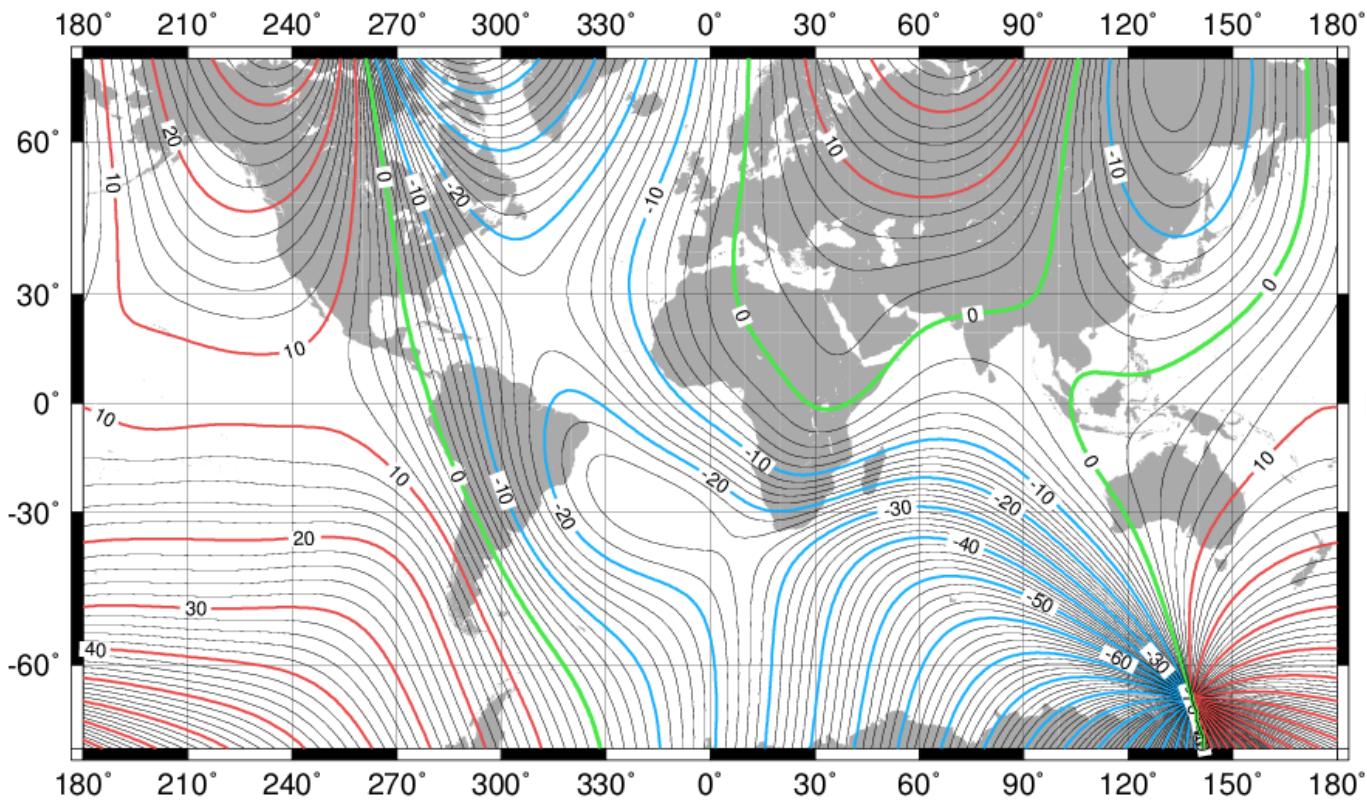


Figura 20: Declinación magnética en dos puntos diferentes de la Tierra [2]

- **Líneas isogónicas:** Se llaman así a las líneas que, sobre las cartas de navegación o los mapas, unen puntos que tienen la misma declinación magnética. Son también denominadas Líneas Isogónicas. Adicionalmente, si una línea corresponde a puntos con declinación 0° , se habla de Línea Agónica.
- **Norte de la Brújula:** Es el norte magnético tal y como lo indica a bordo el instrumento adecuado (brújula o flux valve). No indica realmente el norte magnético pues el instrumento comete errores por diversas razones (presencia de masas metálicas cercanas, líneas de campo magnético que no son horizontales, etc).
- **Desviación magnética:** Es el error angular cometido por la brújula o flux valve. El fabricante de la aeronave puede corregirla hasta cierto punto.

La Figura 22 presenta la relación entre los nortes geográfico, magnético y de la brújula con sus correspondientes diferencias angulares.



Fuente: NOAA - National Geophysical Data Center (NGDC)

Figura 21: Declinación magnética - Año 2000 [2]

- **Norte de la Cuadrícula:** Cuando se navega a grandes latitudes (muy al norte o muy al sur del planeta), no tiene sentido guiarse por el norte magnético debido, entre otras cosas, a las grandes declinaciones implicadas.

Es por ello que se define arbitrariamente el Norte de la Cuadrícula como el norte indicado por los meridianos de la carta de navegación que se está usando para navegar.

6. Cartas de navegación aeronáutica

La carta aeronáutica se define como la representación de una porción de la tierra, su relieve y construcciones, diseñada especialmente para satisfacer los requisitos de la navegación aérea. Se trata de un mapa en el que se reflejan las rutas que deben seguir las aeronaves, y se facilitan las ayudas, los procedimientos y otros datos imprescindibles para el piloto.

El gran problema asociado a la construcción y utilización de cartas es que la superficie de la Tierra **no se puede representar con fidelidad en ninguna carta**. Esto se debe a que una esfera *no es una superficie desarrollable*, es decir, no es posible convertirla a un plano sin generar distorsiones.

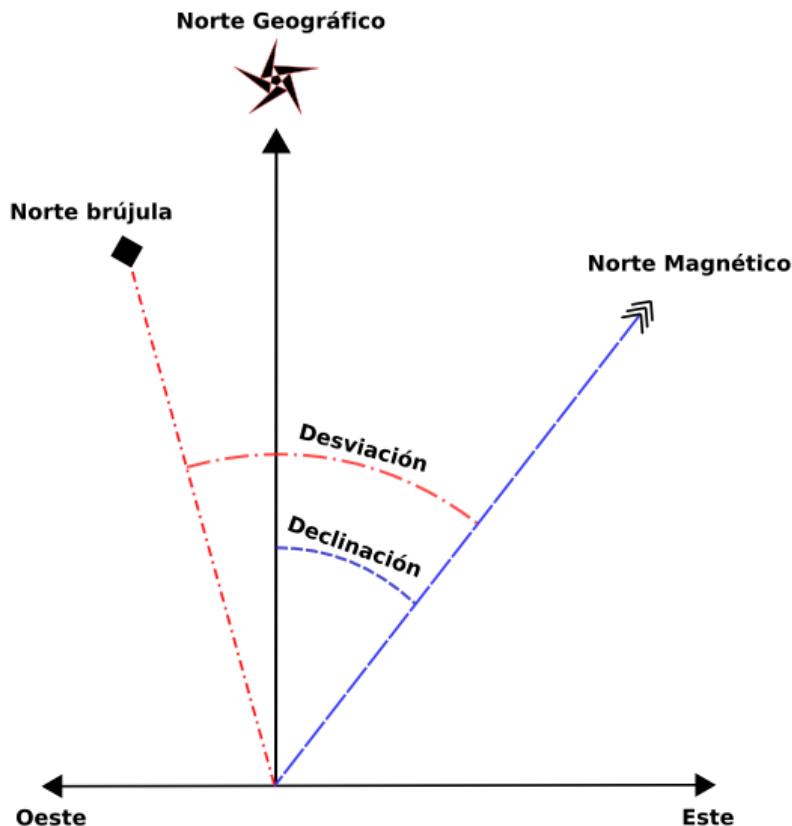


Figura 22: Los diferentes nortes y sus diferencias angulares [2]

Es el mismo problema que enfrentaríamos si intentáramos convertir la cáscara de una naranja en un plano sin alterarla, Figura 23.

Superficies que sí son desarrollables son los cilindros y los conos. En ambos casos, basta con cortar dichas superficies por un lugar conveniente y seguidamente las podemos estirar sin deformarlas y convertirlas en planos.

Por esta razón, la práctica común al construir una carta consiste en proyectar la superficie de la Tierra sobre una de estas tres superficies (plano, cono o cilindro). Dicha proyección consiste en escoger un conjunto de reglas geométricas y aplicarlas sistemáticamente a toda la superficie que se interesa proyectar, Figura 30.

6.1. Proyecciones cartográficas

Como las cartas de navegación en realidad son proyecciones de la superficie terrestre, es conveniente estudiar primero las características de las proyecciones para entender luego las de las cartas.

Existe un gran número de tipos diferentes de proyecciones según el conjunto de reglas que se escojan para hacerla (por ejemplo: punto de origen, tipo de superficie de proyección, posición de la superficie, etc.). Cada uno de estos conjuntos de reglas introduce diferentes tipos de distorsiones, que son inevitables, y en base a éstas se puede a su vez definir diferentes propiedades de la proyección.

La razón de que existan tantos tipos de proyecciones diferentes es que estas propiedades las hacen adecuadas para un uso u otro, según lo que se deseé. En las siguientes secciones estudiaremos las propiedades más importantes que pueden tener las proyecciones, y por ende, las cartas hechas con ellas.

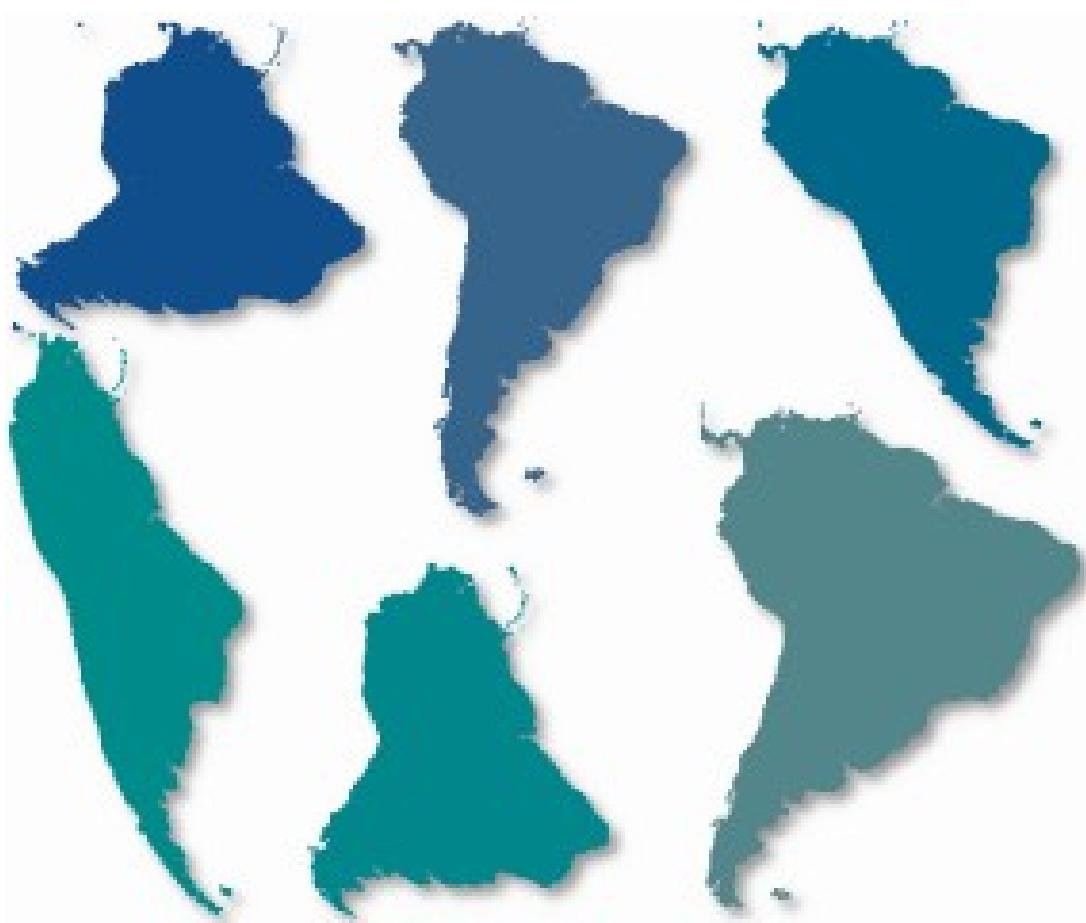


Figura 23: América del Sur en diferentes proyecciones. ¿Cuál es la correcta?

Fuente: <http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/TOC/cartTOC.html>



Figura 24: Proyecciones cartográficas

Entre las propiedades de las proyecciones se tiene:

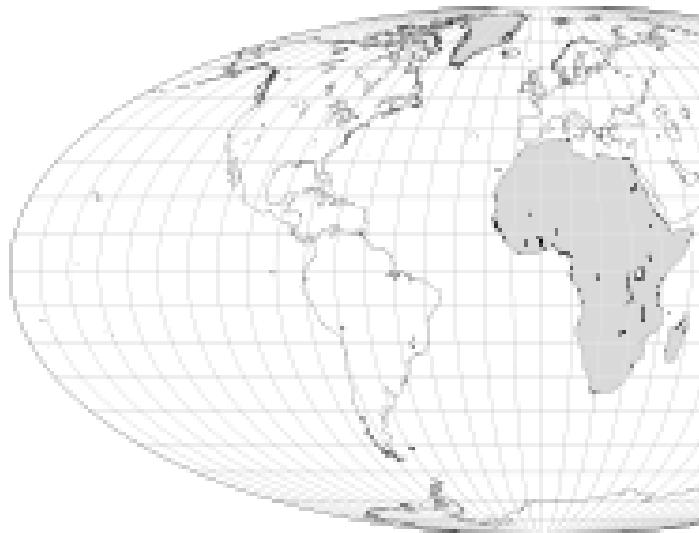
Conformidad Un mapa conforme es aquél que preserva los ángulos (y por tanto, las formas) a nivel local. Esto significa que las formas de características tales como deltas, ríos, etc. son reconocibles, pues la distorsión que sufren no es grande.

Equivalencia Una proyección es equivalente o autállica si mantiene las proporciones entre las áreas representadas. Esto quiere decir que si un país dado A tiene el doble del área que un país B, en una proyección equivalente dicha proporción se mantiene, Figura 25.

Las proyecciones equivalentes o autálicas son de escasa utilidad para la navegación, pero por otra parte son muy útiles cuando se quiere presentar información que ha de compararse a simple vista, como población, producción industrial, etc., o para elaborar atlas escolares.



(a) Proyección Mercator



(b) Proyección Mollweide

Figura 25: Comparación de las superficies de Groenlandia y África según el tipo de proyección utilizada, superficie África = 29800000 km^2 , superficie Groenlandia = 2175600 km^2

Fuente: <http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/CartProp/AreaPres/areaPres.html>

Equidistancia Una proyección es equidistante cuando posee un conjunto bien definido y completo de líneas a lo largo de las cuales la escala se mantiene constante, Figura 26.

Al indicar que posee un conjunto bien definido y completo de líneas, nos referimos al hecho de que muchas proyecciones tienen unas pocas líneas a lo largo de las cuales la escala se mantiene constante (a menudo llamadas líneas automecánicas). No obstante, en las cartas equidistantes el número de líneas que tienen esta propiedad es mucho más grande.

Por ejemplo, es posible crear una carta con una proyección equidistante que esté centrada en una ciudad dada A, y entonces se podría calcular con exactitud la distancia entre tal ciudad A y cualquier otra ciudad que se represente en la carta.

Las cartas equidistantes a menudo distorsionan mucho los ángulos y áreas, y por ello tienen una utilidad limitada. Sin embargo es posible obtener pocas distorsiones si el área representada es pequeña.

Dirección Otra propiedad importante de las proyecciones es la referida a si distorsionan, y de qué manera, las direcciones. Por ejemplo, una proyección que muestra de forma correcta todas las direcciones desde su centro a cualquier otro punto de la carta se llama azimutal.

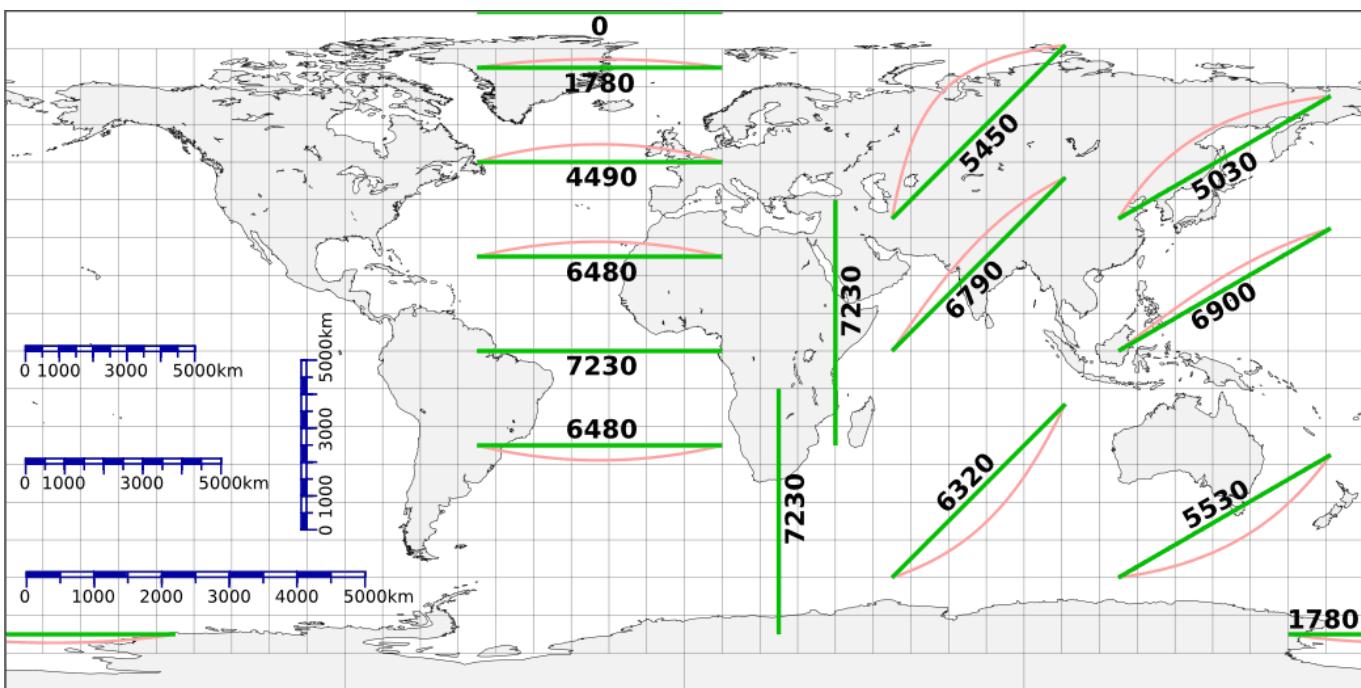


Figura 26: Proyección equidistante cilíndrica, distancias en km. Cada escala gráfica es válida a lo largo de su propio paralelo. Solo la escala vertical es válida en cualquier lugar.

Fuente: <http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/CartProp/AreaPres/areaPres.html>

Hay al menos dos maneras diferentes de entender la dirección: En función del círculo máximo y en función del rumbo, y ambas maneras definen líneas muy importantes:

Líneas Loxodrómicas ver 5.1 de la página 24

Líneas Ortodrómicas ver 5.1 de la página 25

En la Figura 27 puede observarse una comparación entre este tipo de líneas al conectar dos puntos.

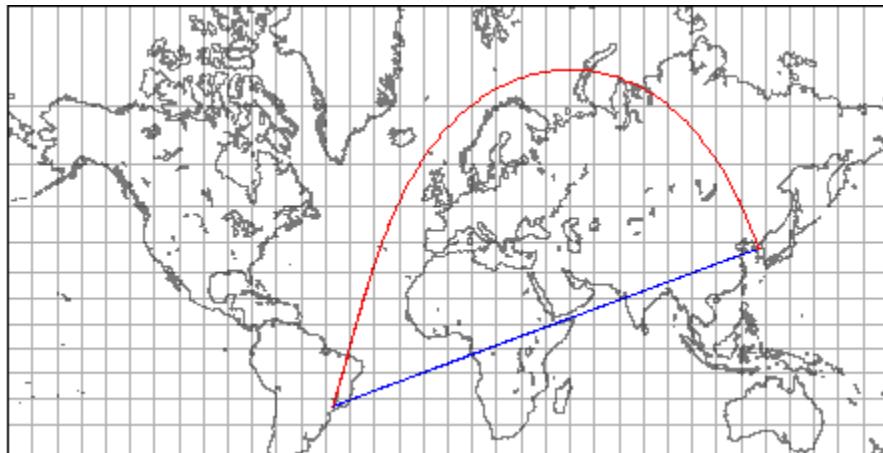
6.2. Las cartas OACI [2]

La seguridad de la navegación aérea exige la elaboración y publicación de cartas aeronáuticas actualizadas y precisas, que respondan a las necesidades actuales de la aviación. En consecuencia, corresponde a cada Estado miembro de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) adoptar las disposiciones necesarias para facilitar el esfuerzo de cooperación que supone la producción y difusión de cartas aeronáuticas. Además, cada Estado tiene la obligación de proporcionar información del propio territorio a través de las cartas aeronáuticas.

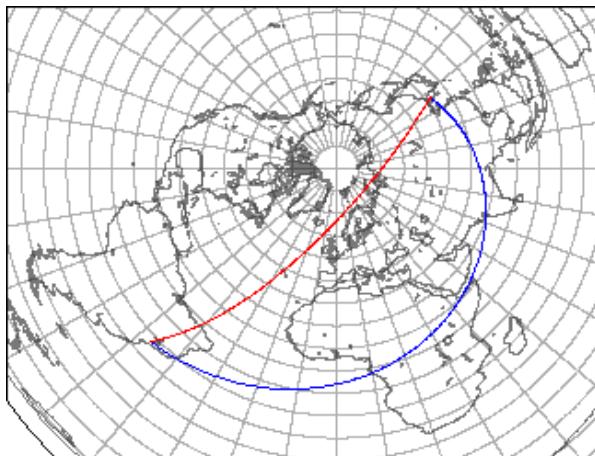
La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), en su Anexo 4 - Cartas Aeronáuticas, ha publicado una serie de normas y métodos recomendados para la elaboración de las mismas. Adicionalmente, y como complemento y ayuda para la puesta en práctica de estas normas, también proporciona el Manual de Cartas Aerónauticas.

Según la OACI, el diseño de las cartas aeronáuticas debe tomar en cuenta una serie de factores, entre los cuales se pueden mencionar:

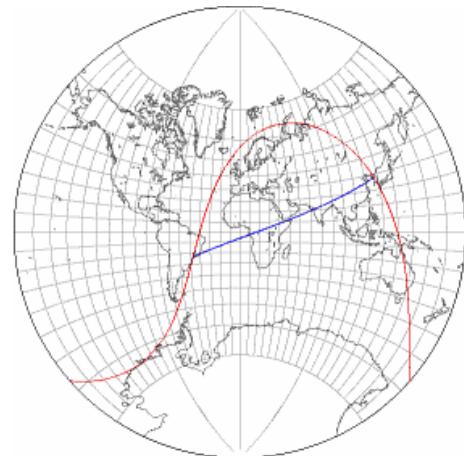
- Debe utilizarse una proyección común.



(a) Proyección Mercator



(b) Proyección polar azimutal equidistante



(c) Proyección Lagrange

Figura 27: Comparación entre loxodromas y ortodromas, azul loxodromica, rojo ortodromica

Fuente: <http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/ShapePres/shapePres.html>

- Las escalas utilizadas deben tener valores fácilmente comprensibles.
- Debe facilitarse la transición de una carta a otra durante el vuelo mediante una adecuada selección de alturas, construcciones u otra información relativa al terreno.
- Deberían publicarse simultáneamente las cartas que tienen conexión entre sí, ya sean cartas nuevas o sus revisiones.

Cartas opcionales. Las seis cartasopcionales se producirán si, en opinión de las Autoridades aeronáuticas de los Estados, contribuyen a la seguridad, regularidad y eficacia de las operaciones de las aeronaves.

Cartas condicionales. Las cinco cartas condicionales se producirán solamente si se cumplen determinadas condiciones o circunstancias.

6.2.1. Cartas OACI obligatorias

El Anexo 4 exige que cada país garantice la disponibilidad de seis (6) tipos diferentes de cartas aeronáuticas que se consideran obligatorias:

Cuadro 1: Cartas aeronáuticas OACI

Grupo	Carta	Requerimientos		
		Obligatoria	Opcional	Condicional
Planificación previa al vuelo	1. Plano de obstáculos de aeródromo – Tipo A (limitadores de utilización). 2. Plano de obstáculos de aeródromo – Tipo B. 3. Plano de obstáculos de aeródromo – Tipo C. 4. Carta topográfica para aproximaciones de precisión.	Red	Blue	Green
En vuelo	5. Carta de navegación en ruta. 6. Carta de área. 7. Carta de salida normalizada – Vuelo por instrumentos (SID). 8. Carta de llegada normalizada – Vuelo por instrumentos (STAR). 9. Carta de aproximación por instrumentos. 10. Carta de aproximación visual.	Red	White	Green
Movimientos en tierra	11. Plano de aeródromo/helipuerto 12. Plano de aeródromo para movimientos en tierra. 13. Plano de estacionamiento y atraque de aeronaves.	Red	Blue	Blue
Navegación aérea visual, trazado de posiciones, planificación	14. Carta aeronáutica mundial (escala 1:1.000.000). 15. Carta aeronáutica (escala 1:500.000). 16. Carta de navegación aeronáutica (escala pequeña). 17. Carta de posición.	Red	Blue	Blue

1. Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo A: Para aquellos aeródromos donde hay obstáculos destacados en el área de la **Trayectoria** de despegue.
2. . Carta topográfica para aproximaciones de precisión - OACI: Para todos los aeródromos con pistas de aproximación de precisión de Categorías II y III.
3. Carta de navegación en ruta - OACI: Para todas las zonas donde se hayan establecido regiones de información de vuelo (FIR).
4. Carta de aproximación por instrumentos - OACI: Para aquellos aeródromos donde se hayan establecido procedimientos de aproximación instrumentales.
5. Plano de Aeródromo/Helipuerto - OACI: Necesario para todos aquellos aeródromos/helipuertos regularmente utilizados por la aviación civil internacional.
6. Carta aeronáutica mundial - OACI, 1:1 000 000: Publicada de acuerdo a lo indicado en el Apéndice 5 del Anexo 4.

6.2.2. Cartas OACI condicionales

Adicionalmente a las anteriores, existen cinco cartas de publicación condicional, lo que significa que han de presentarse determinadas circunstancias para su publicación:

Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo C Necesario sólo si en el AIP⁴ no se publican los datos sobre obstáculos que requieren los explotadores para generar sus procedimientos.

Carta de área - OACI Requerida si las rutas o los requisitos de notificación de posición son complicados y no pueden indicarse adecuadamente en la carta habitual para ello (Carta de navegación en ruta - OACI).

Carta de salida normalizada - vuelo por instrumentos - OACI Llamadas cartas SID, se publican cuando existe una salida normalizada de este tipo y no se pueda indicar con la claridad suficiente en la Carta de área - OACI.

Carta de llegada normalizada - vuelo por instrumentos - OACI Estas son las cartas STAR y se publican cuando existe una llegada normalizada y no se pueda indicar con la claridad suficiente en la respectiva Carta de área - OACI.

Carta de aproximación visual - OACI Necesaria para aquellos aeródromos en los que se cumple al menos una de las siguientes condiciones:

- Sólo existen instalaciones y servicios de navegación limitados.
- No existen servicios de radiocomunicaciones.
- No existen cartas a escala 1:500 000 del aeródromo y sus alrededores.
- Se han establecido procedimientos de aproximación visual.

⁴Una publicación de información aeronáutica, más conocida por las siglas AIP (del inglés: Aeronautical Information Publication), es una publicación editada por las autoridades competentes en aviación civil (o por quien estas designen) que contiene información aeronáutica de carácter esencial para la navegación aérea. Se diseñan para que sean un manual que contenga detalles de leyes, procedimientos operativos, servicios disponibles o cualquier otra información que necesite una aeronave que sobrevuelo el país en particular al que se refiere el AIP.

6.2.3. Cartas OACI opcionales

Finalmente, existen otras seis cartas denominadas opcionales porque la OACI delega a las autoridades de cada país la decisión sobre su publicación si consideran que estas cartas contribuirán a la seguridad, regularidad y eficiencia de las operaciones aéreas.

Tales cartasopcionales son:

1. **Plano de obstáculos de aeródromo - OACI, Tipo B:** Se publica como ayuda para determinar las alturas críticas en algún procedimiento.
2. **Plano de aeródromo para movimientos en tierra - OACI:** Se publica sólo cuando en el Plano de Aeródromo/Helipuerto - OACI no puede indicarse con suficiente claridad los datos necesarios para el movimiento de aeronaves en las calles de rodaje.
3. **Plano de estacionamiento y atraque de aeronaves - OACI:** Publicado cuando, por la complejidad del terminal aéreo, no puede señalarse en el Plano de Aeródromo/Helipuerto - OACI ni en el Plano de aeródromo para movimientos en tierra - OACI suficiente información con respecto al estacionamiento de las aeronaves.
4. **Carta aeronáutica - OACI 1:500 000:** Cuando los requisitos para la navegación visual indiquen que puede sustituir o complementar a la Carta aeronáutica mundial - OACI, 1:1 000 000.
5. *Carta de navegación aeronáutica - OACI, escala pequeña:* Igual que la anterior.
6. **Carta de posición - OACI:** Son cartas útiles para mantener un registro continuo de la posición de una aeronave en vuelo sobre zonas oceánicas o escasamente pobladas.

6.2.4. La carta OACI 1:500 000

Esta carta está basada en la llamada proyección cónica conforme de Lambert, que es una proyección cónica normal secante. La proyección superpone un cono sobre la esfera de la Tierra, con dos paralelos de referencia secantes al globo e intersecándolo. Esto minimiza la distorsión proveniente proyectar una superficie tridimensional a una bidimensional. La distorsión es mínima a lo largo de los paralelos de referencia, y se incrementa fuera de los paralelos elegidos. Como el nombre lo indica, esta proyección es conforme.

Los pilotos utilizan estas cartas debido a que una línea recta dibujada sobre una carta cuya proyección es conforme cónica de Lambert muestra la distancia verdadera entre puntos. Sin embargo, los aviones deben volar rutas que son arcos de círculos máximos para recorrer la distancia más corta entre dos puntos de la superficie, que en una carta de Lambert aparecerá como una línea curva que debe ser calculada en forma separada para asegurar de identificar los puntos intermedios correctos en la navegación.

Es ampliamente utilizada para la navegación aérea visual, considerándose una de las cartas básicas por proporcionar información visual a una escala adecuada.

A continuación se resumen las propiedades más importantes de este tipo de carta:

- Es conforme.
- Los paralelos son arcos de círculo concéntricos, casi equiespaciados.
- Las líneas de graticula se cortan perpendicularmente entre sí.

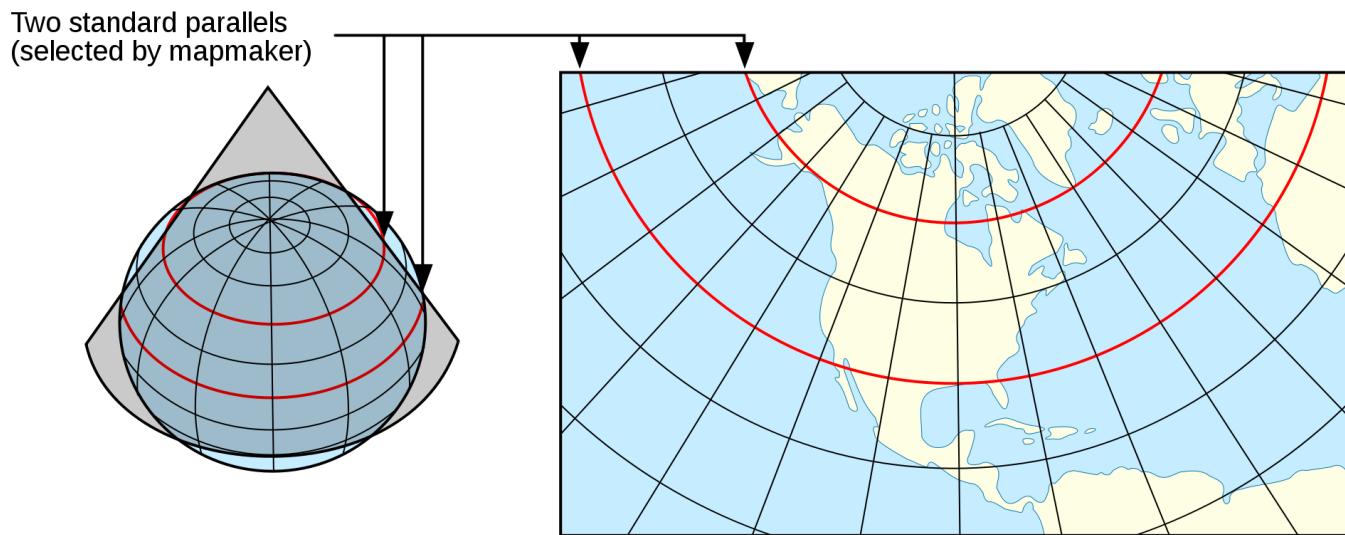


Figura 28: Proyección conforme cónica de Lambert

(Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Proyecci%C3%B3n_conforme_de_Lambert)

- Es prácticamente equidistante.
- Las líneas ortodrómicas⁵ se representan aproximadamente como líneas rectas.

La OACI recomienda que esta proyección se utilice entre el ecuador y los 80° de latitud, en bandas de 2° de latitud. Los paralelos automecónicos⁶ de cada banda se situarían 40' al sur del paralelo norte y 40' al norte del paralelo sur, pero esto varía según la carta. Por ejemplo, la carta correspondiente a Barcelona, España (2319-B) usa como paralelos automecónicos 37° 10' 41"N y 42° 49' 18"N.

Asimismo, los meridianos deberían indicarse a intervalos de 30', con marcas de graduación a intervalos de 1', tanto para los paralelos como para los meridianos. Los intervalos de 10' se marcarán de manera distintiva.

La denominación de esta carta se hará (cuando sea aplicable) en función del número de referencia de la Carta aeronáutica mundial - OACI 1:1 000 000 correspondiente, agregándosele una letra que indique a qué cuadrante de la carta mundial corresponde:

- A - Noroeste
- B - Nordeste
- C - Sudeste
- D - Sudoeste

⁵Una línea ortodrómica (también llamada línea geodésica) es aquella que se traza siguiendo el arco de un círculo máximo.

⁶El paralelo automecónico es aquel que “toca” a la Tierra cuando se “apoya” el cono en ella. O sea es el paralelo de tangencia, por lo tanto el factor de escala es igual a la unidad sobre él.

Si la proyección es secante, hay al menos dos círculos de la esfera, que corresponden con los de intersección entre el cono y la esfera, donde la deformación es cero, y se los denomina *paralelos automecónicos*.

Para la carta de ejemplo mencionado arriba (Barcelona, España 2319-B), 2319 se refiere a la carta mundial, y la letra B indica el cuadrante nordeste.

Dada su función, esta carta tiene que incluir datos topográficos que tengan importancia para la navegación visual, así como: Declinación magnética, espacios áereos, obstáculos, aérodromos y aeropuertos, radioayudas, edificaciones, ríos y lagos, autopistas, carreteras, líneas férreas, puntos de referencia (puentes, ruinas, diques, faros, líneas de alta tensión, etc), fronteras, etc.

6.3. Cartas de aproximación instrumental (IAC = Instrumental Approach Charts)

Como su nombre lo indica son cartas donde se esquematiza la aproximación instrumental a una pista determinada de un aeropuerto y en ella se detalla el tipo de aproximación de la que se trata.

Consta de un encabezado, donde se identifica el aeropuerto, la pista y el tipo de aproximación (NDB, VOR, ILS, etc), en algunas cartas aparecen las letras "A" o "B", en este caso no es una aproximación a la pista, si no solamente lleva al avión hasta el aeropuerto y luego este tendrá que alinearse con la pista, la letra "A" corresponde a la primera aproximación y la "B" a la segunda.

Posee, además, una vista en planta (vista desde arriba) de la aproximación en donde se detallan todos los rumbos y datos generales de la aproximación, también brinda la información de frecuencias, obstáculos (en un recuadro marcado como MSA), aproximación fallida, etc.

Se incluye también una vista de perfil de la aproximación, con información similar a la anterior pero orientada básicamente hacia los rumbos y altitudes a seguir.

En la parte inferior se encuentra una tabla con los valores mínimos operativos de aproximación, los que deberán respetarse para cada categoría de nave, considerando los sistemas de aproximación disponibles y basándose en condiciones de visibilidad y meteorológicas.

Por último puede estar incluido un diagrama de la pista donde se detalla la altura sobre el aeropuerto (HAA) y la altura sobre el umbral de la pista (HAT) al final de la aproximación y los obstáculos adyacentes de importancia. Se incluye en el diagrama una tabla de tiempos (FAF) utilizados en aproximaciones sin precisión.

Después como en todas las demás cartas pueden estar incluidos detalles de elementos de importancia para la maniobra.

6.4. Cartas de salida normalizada (SID = Standard Instrument Departure)

En aeropuertos muy congestionados o con mucho tráfico, los controladores pueden pedirle a los pilotos que sigan un camino común a todos ellos, para evitar tener que explicarle a todos dicha ruta se confeccionan cartas que lo explican.

Similares a las de aproximación estas cartas constan básicamente de una vista en planta (desde arriba) de el camino de salida con las especificaciones necesarias, y una segunda sección con la explicación en forma de texto de dicha salida con el detalle y observaciones necesarias y de importancia.

6.5. Cartas de llegada normalizada - (STAR - Standard Terminal Arrival Chart)

Esta carta es similar a la anterior con la salvedad que esta referida a las llegadas al aeropuerto en lugar de la salida.

Esta descripción de cartas esta basada en el sistema cartografico de los EEUU conocidas como cartas NOS (National Ocean Service, <http://www.nos.noaa.gov>) departamento dependiente del gobierno de los EEUU.

Puede haber alguna diferencias con las especificaciones de otros países de acuerdo a sus necesidades y a la libertad que cada nación posee, aunque el criterio es el de estandarizar y pues como en tantos otros aspectos EEUU es el referente.

En la República Argentina, oficialmente la encargada de producir estas cartas es la Fuerza Aérea Argentina (<http://www.faa.mil.ar>), aunque Aerolíneas Argentinas también tiene producción propia.

Las cartas Jeppesen son producidas por la firma Jeppesen - Sanders (<http://www.jeppesen.com>) de allí el nombre de la carta, dicha empresa es capaz de proveer y mantener actualizada la cartografía de cualquier país, aclarar vale que contienen la misma información que las oficiales, los cambios principales se basan en la calidad de impresión.

Todas las cartas no duran eternamente, caducan después de un tiempo siendo responsabilidad del piloto mantenerlas actualizadas.

Glosario

A

Actitud

Respecto a una aeronave se define como los ángulos que su nariz y alas forman con la referencia que es el horizonte. De esa manera hablamos de actitud nariz arriba, ala izquierda abajo, etc. . 10

L

Latitud

Es la distancia angular entre el ecuador y un punto determinado del planeta. La latitud se mide en grados ($^{\circ}$), entre 0 y 90; y puede representarse de dos formas:

- indicando a qué hemisferio pertenece la coordenada (norte o sur);
- valores positivos -norte- y negativos -sur-;

así, diez grados en latitud norte podría representarse 10°N o 10° ; y diez grados sur podría ser 10°S o -10° . En la navegación marítima la latitud se representa con la letra griega ϕ . 4, 20

Longitud

Expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° ; habitualmente en la actualidad el meridiano de Greenwich (observatorio de Greenwich), pero antiguamente hubo muchos otros que servían como referencia (para el mapa de Ptolomeo el meridiano de Alejandría, para los mapas españoles hasta el siglo XIX el meridiano de Cádiz -observatorio de Cádiz- o el meridiano de Salamanca -observatorio de la Universidad de Salamanca, utilizado por la Compañía de Jesús-, para los franceses el meridiano de París -observatorio de París-, etc.). La longitud geográfica se mide en grados ($^{\circ}$). Existen varias maneras de medirla y expresarla:

- entre 0° y 360° , aumentando hacia el Este del meridiano 0°
- entre 0° y 180° indicando a qué hemisferio pertenece
- entre 0° y 180° positivos -Este- o negativos -Oeste-;

así, noventa grados longitud este puede representarse 90° o 90°E ; y noventa grados Oeste puede ser 270° , 90°O o -90° En navegación marítima la longitud se representa con la letra griega ω . 4, 21

M

Milla estatutaria

Llamada simplemente milla, se sigue usando en los países anglosajones y equivale exactamente a 1,609344 km. En inglés se llama statute mile. En los países que utilizan el sistema métrico, la milla aparece normalmente en la escala de los mapas a fin de que éstos puedan ser estudiados también por los anglosajones. De la misma forma, los países anglosajones van incorporando paulatinamente el kilómetro como dato adicional en su cartografía. Tiene las siguientes conversiones: 0,3333 leguas = 1,609344 km = 1760 yardas = 5280 pies . 24

Milla náutica

Se introdujo en la náutica hace siglos, y fue adoptada (con muy ligeras variaciones) por todos los países occidentales, siendo definida como la longitud de un arco de 1' de meridiano terrestre. Una milla náutica equivale a 1852 m. Su uso está admitido en el Sistema Internacional (SI). . 24

N

Nudo

es una medida de velocidad utilizada tanto para navegación marítima como aérea. Equivale a una milla náutica por hora. También se utiliza en meteorología para medir la velocidad de los vientos. Aunque no existe un símbolo acordado a nivel internacional, tanto la International Hydrographic Organization (IHO) como la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) recomiendan kn. No obstante, a veces se utilizan kt (knot) para el singular (símbolo de kilotonelada) y kts para el plural. . 24

P

Proyección cartográfica

La representación de la superficie de referencia (esfera o elipsoide de revolución) sobre una superficie plana, sin que haya deformaciones es geométricamente imposible. Se producen deformaciones de tipo angular, lineal y superficial al representar en un plano la superficie terrestre. En cartografía, este problema se resuelve mediante las proyecciones cartográficas. La proyección cartográfica consiste en la correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie de referencia y sus transformaciones en el plano, llamado plano de proyección con deformaciones controladas. . 22

T

Trayectoria

Se define como el conjunto de puntos del espacio por los cuales pasa la aeronave durante su vuelo . 4, 6, 40

A. Lista de Acrónimos

2D : Latitud y Longitud

3D : Latitud, Longitud y Altitud

Referencias

- [1] Aena - SENASA. *Módulo 4: Circulación aérea Unidad 1: Fundamentos y procedimientos.*
- [2] Salazar Hernández Dagoberto José. *Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía*. 6ta edición, 2008. <http://atenea.upc.edu>.
- [3] Wikipedia. Wikipedia. la enciclopedia libre (español). <http://es.wikipedia.org>.

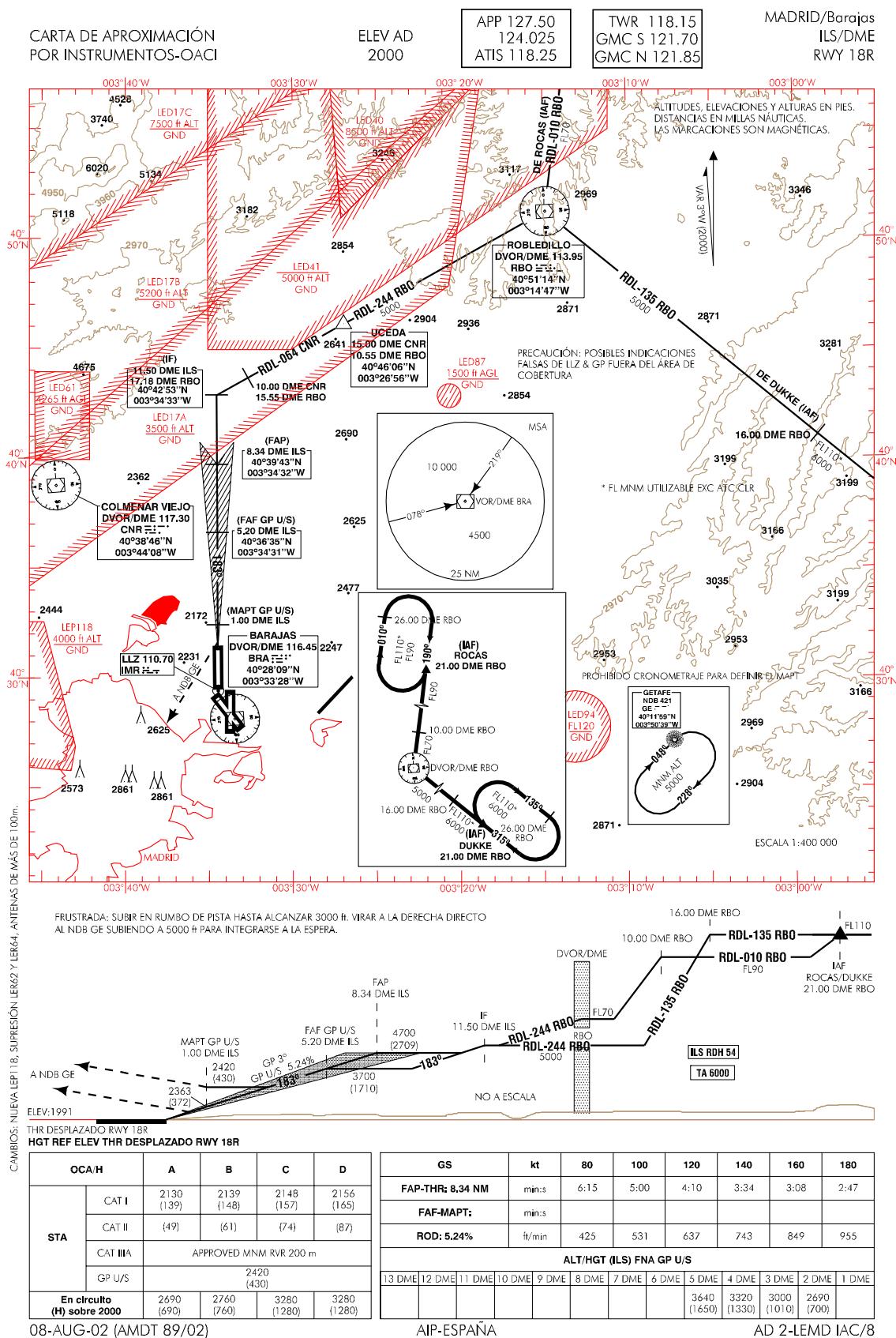
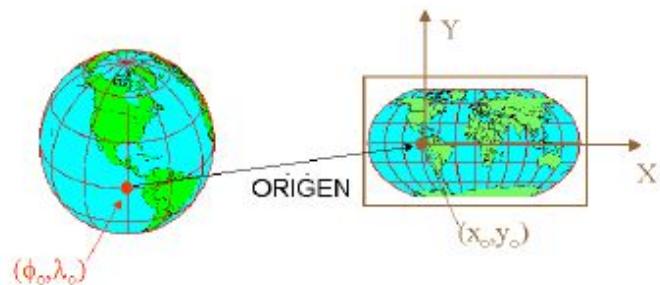


Figura 29: Carta de aproximación aeropuerto Barajas (Madrid-España), uso didáctico, orientativo y no usar para un vuelo real, (Fuente: <http://www.ultraligero.net/Aproximaciones/aprox.htm>)



(a) Concepto de proyección



(b) Tipos de proyecciones

Figura 30: Proyecciones cartográficas