

**SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA TERRESTRE.
SISTEMAS DE COORDENADAS**

Valencia, Enero de 2010

Ángel Martín Furones
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría
Universidad Politécnica de Valencia

INDICE

1	Introducción.....	3
2	Sistema de referencia terrestre geocéntrico convencional.....	3
2.1	Definición del sistema.....	3
2.2	Sistemas de coordenadas.....	4
2.2.1	Coordenadas cartesianas y esféricas.....	4
2.2.2	Sistema de coordenadas geográficas.....	5
2.2.3	Sistema de coordenadas geodésicas y geocéntricas. Sistema de referencia geodésico.....	6
2.2.4	Sistema de coordenadas astronómicas. Sistema de referencia gravífico....	7
2.3	Movimiento del polo. Coordenadas instantáneas y absolutas.....	8
2.4	Sistemas de referencia geodésicos.....	12
2.4.1	Sistemas de referencia geodésicos globales.....	12
2.4.2	Sistemas de referencia geodésicos locales.....	13
2.5	Marco de referencia terrestre internacional (ITRF).....	14
2.5.1	Marco de referencia WGS84.....	17
2.5.2	Marco de referencia I.G.S.....	18
2.5.3	Sistema y marco de referencia terrestre europeo (ETRF89).....	19
	Bibliografía.....	21

1.- INTRODUCCIÓN

Será necesario un sistema de referencia terrestre para la determinación de coordenadas sobre la Tierra, de manera que se convierte en una herramienta imprescindible en el desarrollo de la Cartografía, la Topografía, la Navegación sobre la superficie terrestre y para la localización de cualquier observación que se realice.

En primer lugar se deben distinguir los conceptos Sistema de referencia, Sistema de referencia Convencional, Marco de referencia y Sistema de Coordenadas:

Sistema de referencia es una definición conceptual de teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una tripleta de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y su orientación.

Sistema de referencia convencional es un sistema de referencia donde todas las constantes numéricas, parámetros e hipótesis y teorías para el establecimiento del sistema de referencia son especificadas de modo concreto.

Marco de referencia es la materialización de un sistema de referencia convencional a través de observaciones, es decir, se trata de un conjunto de puntos (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en ese sistema de referencia convencional y que sirven para materializar en el espacio el sistema de referencia.

Sistema de coordenadas es la parametrización de las coordenadas de los puntos que forman el marco de referencia. En este sentido existen infinitos sistemas de coordenadas para parametrizar el marco de referencia, por ejemplo las coordenadas (x,y,z) , (φ,λ,H) , (E,N,h) , etc.

2. SISTEMA DE REFERENCIA TERRESTRE GEOCÉNTRICO CONVENCIONAL

2.1- Definición del sistema

Se utilizarán unos ejes de coordenadas fijos sobre la Tierra, es decir, que giren con ella, de manera que las coordenadas de un punto, en principio, serán siempre las mismas.

Los convencionalismos que llevan el sistema de referencia a convencional son:

- Origen: Centro de masas terrestres o geocentro, incluyendo la atmósfera y los océanos.
- Eje Z: coincide con el eje de rotación terrestre.
- Plano meridiano: pasa por cualquier punto de la tierra y contiene al eje de rotación.
- Plano ecuador: es perpendicular al eje de rotación y pasa por el geocentro.
- Eje X: se sitúa en la dirección del plano meridiano que pasa por Greenwich y contenido en el plano ecuador. Es considerado internacionalmente como meridiano origen o meridiano cero desde 1891.
- Eje Y: contenido en el plano ecuador y perpendicular al eje X y su sentido será tal que los tres ejes formen una tripleta dextrógira.

2.2- Sistemas de coordenadas

2.2.1.- Coordenadas cartesianas y esféricas

Cualquier punto de la superficie terrestre presentará coordenadas (X, Y, Z) en la tripleta de ejes coordenados definida, siendo estos puntos los que constituyen el marco de referencia, figura 1

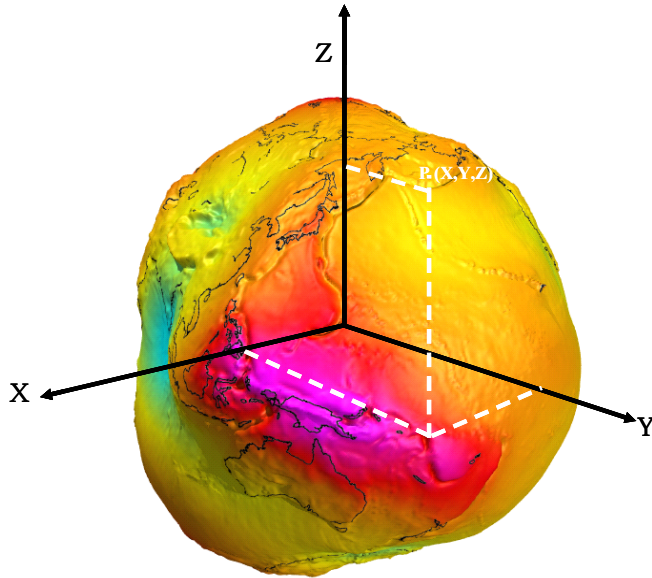


Figura 1: Sistema de coordenadas cartesianas.

En cualquier caso es habitual el uso de coordenadas esféricas para la parametrización de los puntos sobre la Tierra, (r, ϕ, λ) , figura 2, donde, de forma genérica, r es la distancia radial al geocentro, ϕ la latitud geocéntrica (ángulo entre r y el plano del ecuador) y λ la longitud geocéntrica (ángulo entre el plano meridiano de Greenwich y el del punto de cálculo, medido en el plano del ecuador).

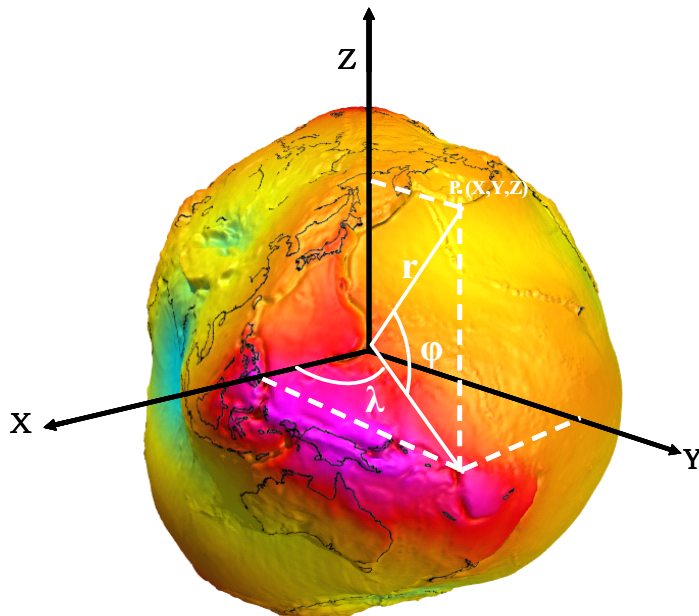


Figura 2: Sistema de coordenadas esféricas.

La relación entre las coordenadas esféricas y las cartesianas es un producto de matrices correspondiente a la parametrización regular de la esfera:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos \lambda \cos \varphi \\ \operatorname{sen} \lambda \cos \varphi \\ \operatorname{sen} \varphi \end{pmatrix}$$

Para la correcta definición de la distancia radial r (distancia diferente para cada punto de la Tierra y que no sigue ningún patrón geométrico exacto), se debe introducir una superficie de referencia como aproximación a la forma real de la Tierra.

2.2.2- Sistema de coordenadas geográficas

En primera aproximación la Tierra es una esfera homogénea de radio R .

El eje de rotación corta la superficie terrestre en dos puntos: el polo geográfico Norte (P_N) y en el polo geográfico Sur (P_S). El polo geográfico Norte es aquel desde el que si se observa la Tierra hacia su interior, esta rota en el sentido contrario a las agujas del reloj, figura 3.

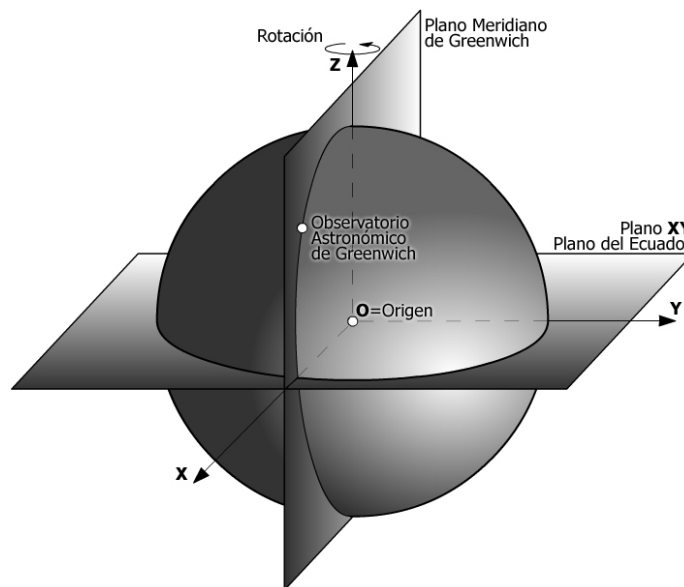


Figura 3: Aproximación esférica a la Tierra.

La vertical de cualquier punto sobre la superficie terrestre pasará por el centro de la Tierra.

La posición de un punto E de la superficie de la Tierra se determina por dos coordenadas, figura 4:

- Se llama latitud geográfica (φ) del punto E al ángulo que forma la vertical de E con el plano del ecuador terrestre. La latitud geográfica varía de 0° a 90° en el hemisferio boreal (latitud norte) y de 0° a -90° en el hemisferio austral (latitud sur).
- Se llama longitud geográfica (λ) del punto E al ángulo que forma el meridiano del punto con el meridiano origen. La longitud geográfica varía de 0° a 180° en

el hemisferio oriental y de 0° a -180° en el hemisferio occidental, es decir, el primero al este y el segundo al oeste.

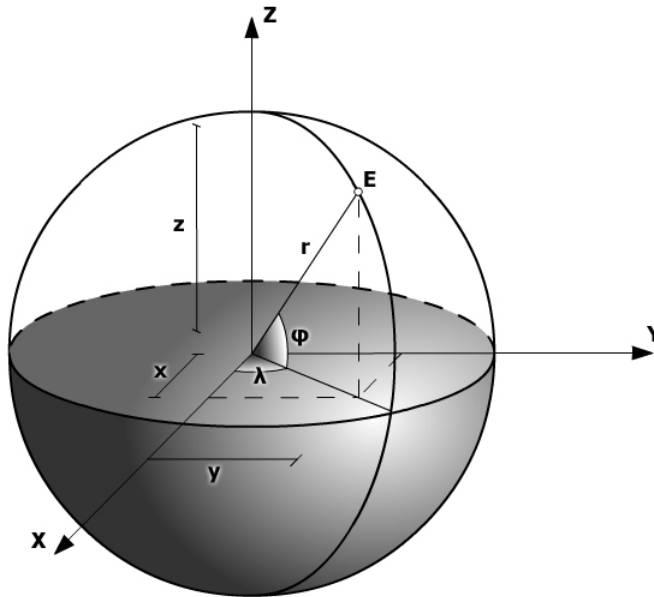


Figura 4: Coordenadas Geográficas.

2.2.3- Sistema de coordenadas geodésicas y geocéntricas. Sistema de referencia geodésico

La segunda aproximación a la forma de la Tierra es un elipsoide de revolución definido por su semieje mayor (a) y su semieje menor (b) o aplanamiento (f). El centro del elipsoide coincide con el centro del sistema de referencia, es decir, con el geocentro y el semieje menor se hace coincidir con el eje de rotación terrestre quedando así constituido el sistema de coordenadas geodésico.

La vertical geodésica en un punto de la superficie del elipsoide de revolución coincide con la dirección del vector normal al elipsoide en dicho punto, y, por tanto, no pasa por el centro del elipsoide, figura 5.

Así las coordenadas geodésicas serán:

- Latitud geodésica: es el ángulo que forma la vertical geodésica del punto con el plano ecuador geodésico.
- Longitud geodésica: es el ángulo formado por el meridiano geodésico del punto de cálculo y el meridiano geodésico origen.

Introducimos en este momento las coordenadas geocéntricas ya que, sobre el elipsoide no coincidirán con las geodésicas, en este caso la longitud geocéntrica será igual a la geodésica, pero la latitud geocéntrica (β), será el ángulo entre la línea que une el centro del elipsoide y un punto sobre el elipsoide y el ecuador geodésico.

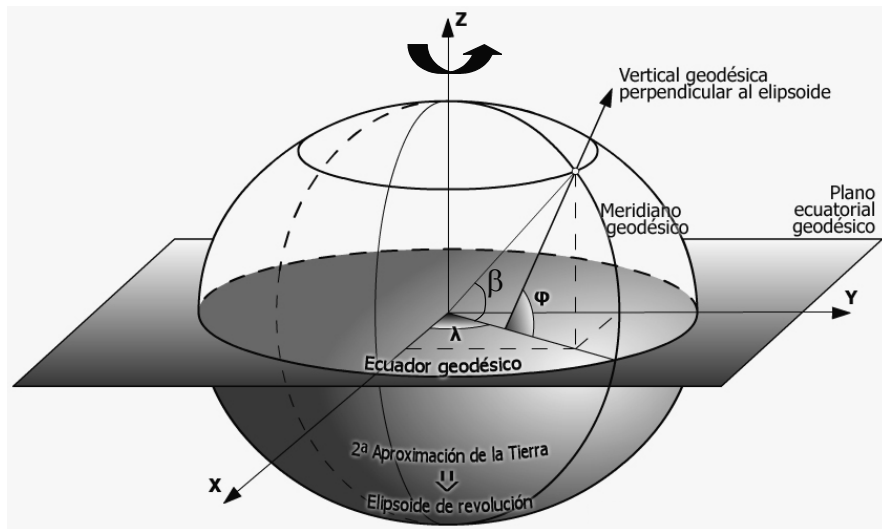


Figura 5: Coordenadas geodésicas y geocéntricas.

2.2.4- Sistema de coordenadas astronómicas. Sistema de referencia gravífico.

Las observaciones astronómicas, geodésicas y topográficas se efectúan sobre la superficie real de la Tierra y en un momento de tiempo determinado, así se debe retocar el concepto de figura y forma de la Tierra y pasar a la definición de geoide como figura y situar las observaciones en un momento determinado.

El geoide se define como superficie equipotencial respecto a la gravedad y normal a su dirección, siendo esta dirección normal la de la fuerza de gravedad que será la que sigue un rayo óptico de un instrumento topográfico cuando se estaciona, o línea de la plomada. Debido a la distribución no homogénea de masas en el interior de la Tierra y a la forma achatada por los polos, esta línea no coincidirá ni con la vertical geográfica ni con la geodésica ni con la geocéntrica, figura 6.

Así se puede definir:

- Dado un punto P de la superficie topográfica terrestre se denomina vertical astronómica instantánea de P a la recta tangente en P a la línea de la plomada en ese punto.
- Se denomina plano ecuador astronómico instantáneo al plano perpendicular al eje instantáneo de rotación que pasa por el centro de masas de la Tierra.
- Se llama plano meridiano astronómico instantáneo de P al plano que contiene a la vertical astronómica de P y al eje instantáneo de rotación terrestre.

Definiéndose las coordenadas astronómicas instantáneas como:

- Latitud astronómica de P es el ángulo Φ que forma la vertical astronómica de P con el plano del ecuador astronómico instantáneo. Varía de 0° a 90° en el hemisferio astronómico norte y de 0° a -90° en el hemisferio astronómico sur.
- Longitud astronómica de P es el ángulo Λ que forma el plano meridiano astronómico instantáneo de P con el plano meridiano astronómico instantáneo tomando como origen (Greenwich). Se suele considerar de 0° a 360° positiva al este.

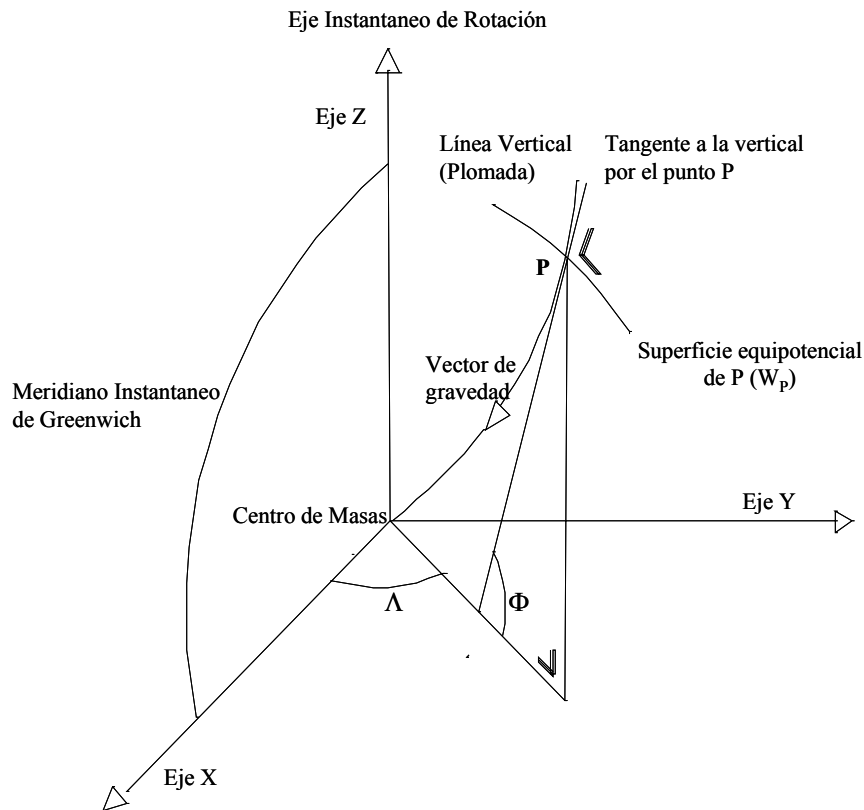


Figura 6: Coordenadas Astronómicas

2.3.- Movimiento del polo. Coordenadas instantáneas y absolutas

La dirección del eje de rotación terrestre cambia con el tiempo respecto a la propia superficie terrestre y, por tanto, respecto al sistema de referencia geocéntrico terrestre.

El polo describe a lo largo del tiempo una trayectoria libre que es una curva más o menos circular de radio 6 metros, figura 7, y periodo aproximado de 430 días provocado por el carácter deformable de la Tierra: redistribuciones interiores de las masas terrestres, efectos del rebote postglaciar en Canadá y Fenoscandia, movimientos tectónicos, redistribuciones atmosféricas, etc., figura 8.

Superpuesta a ésta trayectoria libre se encuentran una serie de oscilaciones forzadas provocadas por la influencia gravitatoria del Sol y la Luna con una magnitud de 60 centímetros, figura 7.

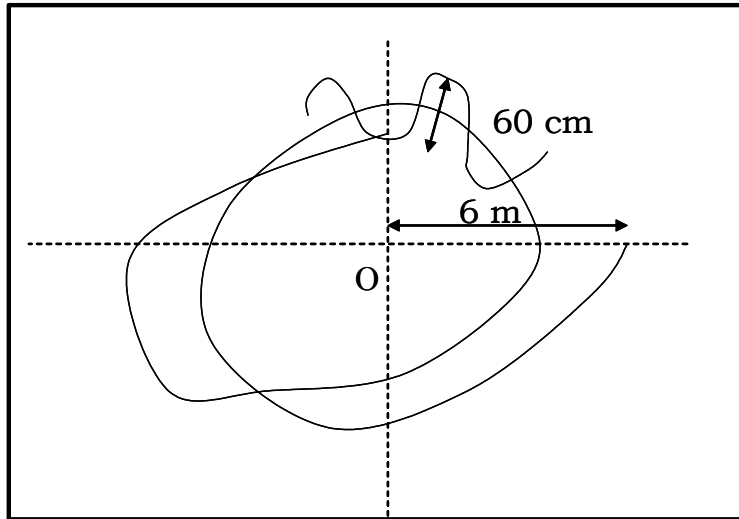


Figura 7: Movimiento libre y oscilaciones forzadas que cuya suma describe el movimiento del polo.

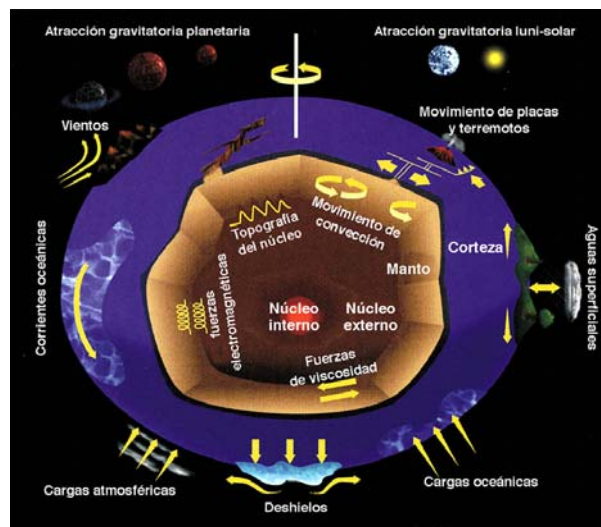


Figura 8: Causas del movimiento del polo.

Este movimiento del polo afecta directamente a las coordenadas de los puntos sobre la superficie terrestre, ya que el sistema de referencia irá cambiando. Lo más indicado es tomar como eje Z de referencia el origen o centro de los círculos de movimiento libre, quedando así determinado el eje Z de un modo convencional.

Si las coordenadas de los puntos se refieren al polo convencional tendremos coordenadas absolutas, si se refieren al polo instantáneo (situación del eje de rotación en un determinado momento) tendremos coordenadas instantáneas.

No hay teoría científica que pueda predecir el movimiento del polo, y, por lo tanto, su posición, así que se monitoriza continuamente mediante observaciones. Esta materialización se realizaba con observaciones astronómicas lo que dio lugar al establecimiento de tres polos diferentes.

- Polo C.I.O.: desde 1899 la International Latitude Service (ILS) utilizando observaciones astronómicas sobre cinco estaciones en un mismo paralelo ($\varphi = 39^\circ 08'$) llegó a la definición del polo CIO (Convencional International Origen), definido como la posición media del polo entre 1900 y 1905, de manera que se obtuvieron determinaciones precisas de

los largos períodos del movimiento del polo (su situación año a año, figura 9). La precisión de estas determinaciones se cifró en 3 metros.

- Polo B.I.H. (Bureau International de l'Heure) : Por otro lado, el eje X del sistema de referencia geocéntrico terrestre convencional, se determinó a partir de las longitudes de 50 estaciones por la BIH, creada en 1912 para mantener la escala de tiempo uniforme, es decir, era el organismo encargado del mantenimiento de la hora y de la posición del origen de longitudes (posición media del observatorio astronómico de greenwich) a través de determinación de la longitud astronómica de los observatorios pertenecientes a este organismo. La determinación de la latitud de estos observatorios generó el polo BIH que proporcionaba estimaciones más frecuentes (medias de 5 días) y precisiones de 1 metro en la determinación del movimiento del polo.
- Polo I.P.M.S. Cada vez con más frecuencia se empezó a necesitar los movimientos de corto periodo del polo para aplicaciones geodésicas y astronómicas, figura 9, por lo que el ILS se reorganizó en 1962 en el Internacional Polar Motion Service (IPMS), así surge el polo IPMS generado a partir de determinaciones de latitud astronómica en 80 estaciones y con precisión de un metro en la determinación del movimiento del polo.

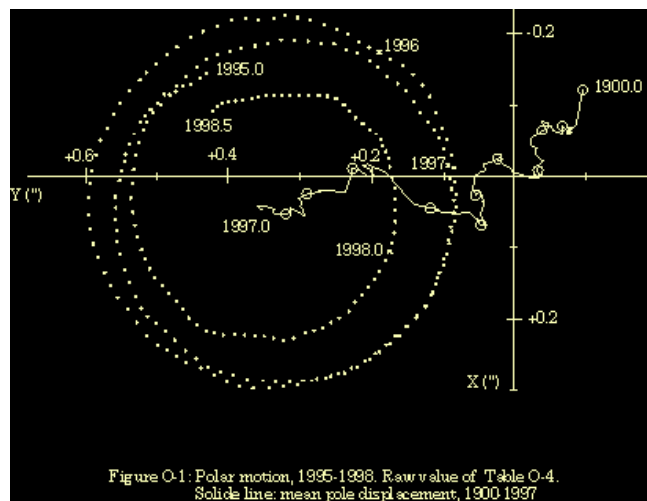


Figura 9: Movimientos de largo y corto periodo del polo.

En 1967 el polo CIO es aceptado como estándar por la International Astronomical Union para dar así continuidad a las observaciones más antiguas referidas al polo CIO, por lo que los polos BIH e IPMS se intentan referenciar al polo CIO; esto no es posible debido a las precisiones de los diferentes polos, ya que se trata de la determinación de un círculo aproximadamente de 6 metros de diámetro que queda definido con 3 metros de error en el polo CIO y con un metro en los otros dos, es decir, en realidad, con estas precisiones, se está hablando del mismo polo.

La situación se complica a partir de ese año debido a la irrupción de la geodesia por satélite. Se empiezan a utilizar medidas a satélite para la determinación del movimiento del polo, en concreto medidas Doppler a los satélites de la constelación TRANSIT, alcanzando precisiones de 0.2 metros.

En los años siguientes nuevas técnicas espaciales demuestran la precisión de las mismas en la determinación del movimiento del polo: medidas láser a satélites o a la Luna, VLBI, GPS, DORIS, PRARE. Todas estas técnicas se basan en la medición continua de coordenadas, por lo que la monitorización del polo es permanente y su precisión se reduce hasta los 6-8 centímetros.

Así, en 1984 la BIH estableció un nuevo sistema de referencia terrestre, basado en las coordenadas cartesianas geocéntricas de las estaciones fundamentales donde técnicas espaciales habían sido aplicadas, este nuevo sistema coincide con el polo CIO astronómico si se tienen en cuenta las precisiones en la determinación del CIO, lo cual permite dar continuidad a las coordenadas determinadas antiguamente.

Finalmente, en 1987, se creó la Internacional Earth Rotation Service (IERS), reemplazando a la BIH y a la IPMS para, entre otras cosas, monitorizar el movimiento del polo basándose en técnicas espaciales de forma continua (obtención del polo instantáneo, figura 10), con lo que el polo BIH determinado en 1984 pasó a llamarse polo IERS. Desde abril de 2003 el nombre fue cambiado al de Internacional Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), proporcionando las coordenadas instantáneas del polo para cada día referidas al polo IERS, cuyo eje X será el meridiano de Greenwich convencional y el eje Y está situado hacia el Oeste (dirección de su sentido positivo) formando 90 grados, las unidades de estas coordenadas son segundos de arco, figura 11.

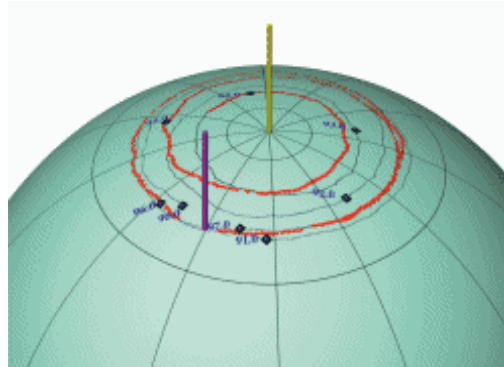


Figura 10: Polo instantáneo en lila y polo medio en amarillo.

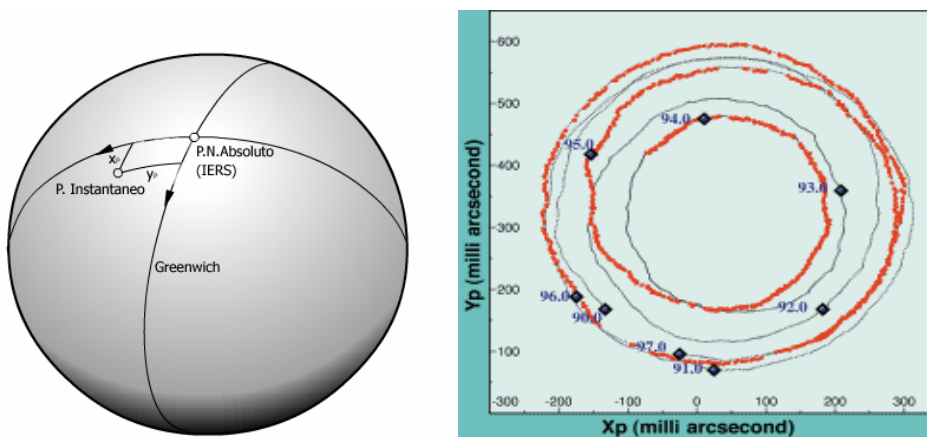


Figura 11: Sistema de referencia y coordenadas en las que se expresa el movimiento del polo.

En las páginas <http://www.iers.org> y <http://hpiers.obspm.fr> se puede encontrar mucha más información.

Como se ha dicho las mediciones se realizan en un momento determinado (t), conociendo, a través de los valores proporcionados por la IERS, los valores para el movimiento del polo, se podrán transformar los valores de latitud y longitud instantáneos a valores de latitud y longitud absolutos sobre el sistema de referencia

geocéntrico terrestre convencional. Los valores de esta corrección rondan los 0.1 segundos.

2.4.- Sistemas de referencia geodésicos

2.4.1.- Sistemas de referencia geodésicos globales. GRS80 y WGS84

Se definirá dátum como el conjunto de parámetros que definen la posición de un elipsoide respecto a la tierra. Para determinarlo hace falta conocer la geometría del elipsoide a y f , su posición respecto al geocentro ΔX , ΔY , ΔZ (coordenadas del centro del elipsoide respecto al geocentro), su orientación $R1$, $R2$, $R3$ (orientación de los ejes del elipsoide respecto a los terrestres) y la escala k .

Si $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0$, el dátum Geodésico se llama Global o absoluto.

El **Geodetic Reference System 1980 (GRS80)** adoptado por la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) por su asamblea general de Camberra en 1979, pertenece a este grupo.

Este sistema reemplaza al GRS67 por no representar adecuadamente el tamaño, forma y el campo gravitatorio con precisión suficiente para la mayoría de aplicaciones geodésicas, geofísicas, astronómicas e hidrográficas.

Los principales parámetros del sistema son:

$a = 6378137$ m. (Obtenido a partir de medidas SLR y Doppler).

$J_2 = 108263 \cdot 10^{-8}$ (Obtenido a partir de perturbaciones en la órbita de satélites).

$GM = 3986005 \cdot 10^8$ m³/sg² (Obtenido a partir de SLR, LLR y pruebas espaciales).

$\omega = 7293115 \cdot 10^{-11}$ rd/sg (Obtenido a partir de medidas astronómicas).

La orientación del eje Z será la definida por el polo C.I.O., como eje X el meridiano 0 definido por la B.I.H. y el eje Y formando la tripleta dextrógira.

Este sistema sigue en vigor y no se ha actualizado en su definición ya que se debe tener en cuenta que por debajo del metro en la diferencia de parámetros, no existe una diferencia práctica en la determinación de coordenadas

Cuando la información sobre el datum se obtiene a partir de posiciones dentro de la órbita de los satélites (determinación dinámica del sistema), los coeficientes del potencial gravitatorio (J_2), así como algunas constantes (ω , velocidad de la luz, constante gravitatoria geocéntrica) forman parte de la definición del datum ya que se calculan todas juntas.

Un ejemplo de éste último grupo es el **World Geodetic System 1984 (WGS84)** utilizado por la técnica GPS y obtenido exclusivamente a partir de los datos de la constelación de satélites GPS.

Los valores de sus principales parámetros son:

$a = 6378137$ m

$J_2 = 108262,9983 \cdot 10^{-8}$

$GM = 3986004.418 \cdot 10^8$ m³/sg²

$\omega = 7293115 \cdot 10^{-11}$ rd/sg

$$1/f = 298.257223563$$

El World Geodetic System 1984 (WGS84) utiliza como eje Z el polo I.E.R.S., como eje X el meridiano 0 definido por el I.E.R.S. y el eje Y formando la tripleta dextrógira. Su origen coincide con el geocentro.

A nivel práctico, tal como se puede deducir, el GRS80 y el WGS84 se pueden considerar idénticos.

2.4.2- Sistemas de referencia geodésicos locales. ED50.

Si $\Delta X \neq \Delta Y \neq \Delta Z \neq 0$ nos encontramos ante un datum local. El marco local queda definido por siete parámetros (o, mejor dicho, 6 más una condición): valores para a y f (geometría del elipsoide), valores de las desviaciones de la vertical (ξ , η) y de la ondulación del geoide (distancia entre el elipsoide de referencia y el geoide), con estos tres parámetros se obtiene la orientación del elipsoide, el acimut geodésico de una línea y, como condición, que el semieje menor del elipsoide y el eje medio de rotación terrestre sean paralelos.

Un ejemplo de este tipo de sistemas es el ED-50 (European Datum de 1950), sistema al que está referida toda la cartografía española.

Este sistema adoptó el elipsoide de Hayford o Internacional, introducido por la IUGG en su asamblea general de 1924 en Madrid, donde a y f fueron obtenidas a partir de mediciones astronómicas y geodésicas en los Estados Unidos.

$$a = 6378388$$

$$f = 1/297$$

Como punto fundamental se adoptó Potsdam, lugar donde la desviación de la vertical (diferencia angular entre la vertical geodésica y astronómica) es conocida, de manera que el elipsoide queda orientado respecto a la Tierra. Cabe destacar que fijar los valores de la desviación de la vertical (ξ , η) y el valor de la ondulación del geoide N en el punto fundamental para orientar el elipsoide es equivalente a fijarlo a partir de las coordenadas X , Y , Z de su centro respecto al geocentro, figura 12.

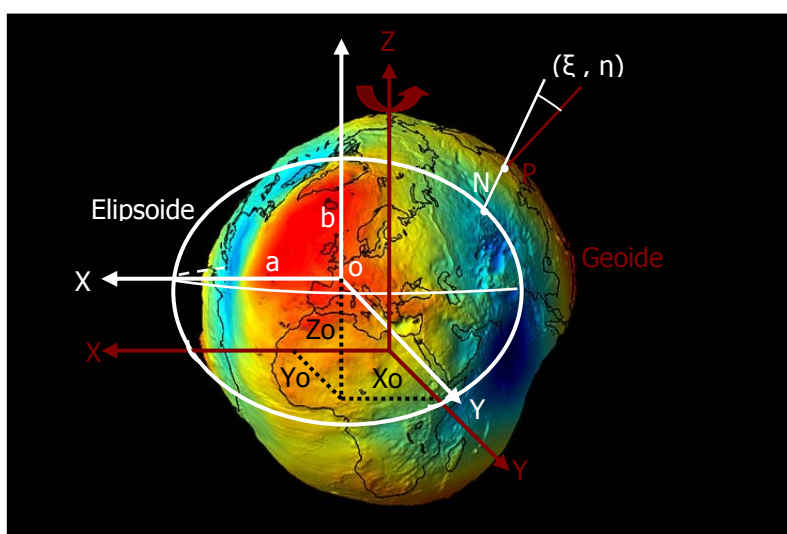


Figura 12: Sistema geodésico local.

La exactitud de ED50 oscila entre unos pocos metros en el centro de Europa a más de 10 en el sur, aunque su precisión relativa es mucho mayor y más que suficiente para los levantamientos cartográficos de pequeñas y medianas escalas, por lo que en 1968, el Servicio Geográfico del ejército lo adopta para su cartografía básica 1/50000 e igualmente el IGN en 1979.

2.5.- Marco de referencia terrestre internacional (ITRF)

El sistema de referencia terrestre internacional convencional se materializa a través de las coordenadas de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo en ese sistema de referencia, constituyendo el ITRF (Internacional Terrestrial Reference Frame), establecido y mantenido por la IERS.

Básicamente el sistema que materializa se define como geocéntrico (incluyendo la atmósfera y los océanos) y con orientación de sus ejes tal como estableció la BIH en 1984:

- Eje Z: Polo medio determinado por la IERS y llamado IERS Reference Pole (IRP) o Convencional Terrestrial Pole (CTP).
- Eje X: Meridiano de Greenwich Convencional determinado por la IERS y llamado IERS Reference Meridian (IRM) o Greenwich Mean Origin (GMO).
- Eje Y: Formando una triplete dextrógira con los ejes anteriores sobre el plano del ecuador convencional.

El marco está formado por coordenadas cartesianas y velocidades de una serie de estaciones equipadas con técnicas de observación espacial (VLBI, SLR, LLR, GPS desde 1991 y DORIS desde 1994), figura 13. Si se desean coordenadas geodésicas se recomienda el uso del elipsoide GRS80. Estas coordenadas definen implícitamente los ejes coordenados X, Y, Z, del sistema de referencia, por lo que proporcionan su orientación.

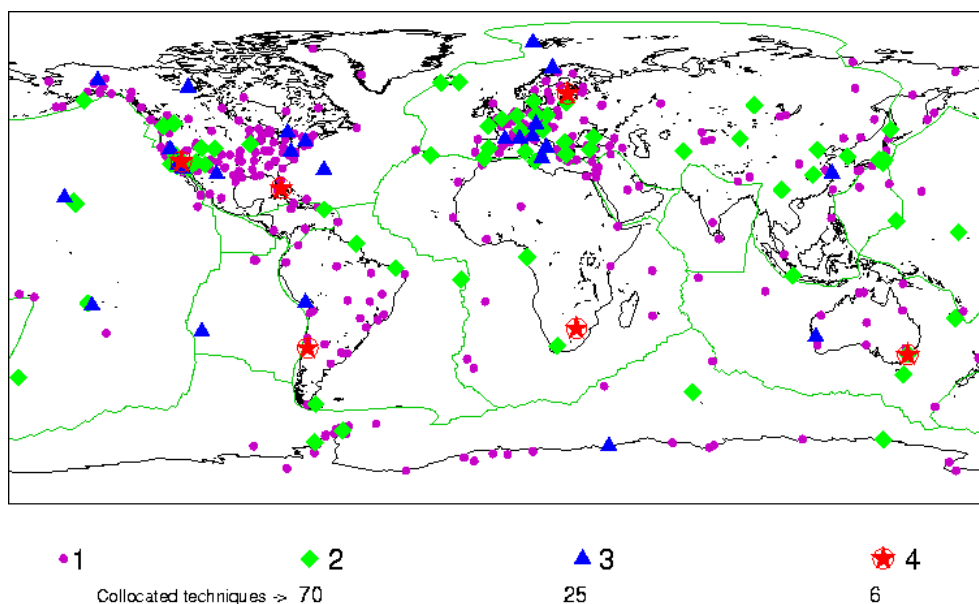


Figura 13: Estaciones que forman el ITRF2000 simbolizadas según el número de técnicas espaciales diferentes que utilizan.

La historia de los diferentes ITRF comenzó en 1984, y, a partir de ahí se han obtenido las soluciones 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 2000 y, recientemente la 2005, estas soluciones difieren unas de otras debido a la incorporación constante de nuevas estaciones, nuevas observaciones en las estaciones ya existentes o mejora en la precisión de las mismas.

Por ejemplo, la solución ITRF2000 está basada en 800 determinaciones en cerca de 500 sitios, figura 13, en cada sitio donde es posible varias técnicas espaciales, cada una de ellas se utiliza individualmente para la determinación de la posición y de la velocidad y los datos son analizados por diferentes equipos para evitar posibles errores sistemáticos.

El establecimiento de un marco de referencia de precisión no es tarea sencilla ya que la Tierra sufre deformaciones debido a su carácter elástico y las precisiones de las observaciones son cada vez mayores, por lo que las observaciones deben ser corregidas por los efectos de:

- Mareas terrestres.
- Carga atmosférica y oceánica.
- Tectónica de placas. El modelo que se usa actualmente es el NNR-NUVEL-1A, basado en que no existen rotaciones residuales en el modelo tectónico de placas considerado, es decir, la suma de las velocidades de las placas sobre toda la Tierra es cero.
- Movimientos locales y regionales. Un ejemplo sería el rebote postglacial de Escandinavia.

Por tanto, y tal como se puede ver en la tabla 1, el ITRF es un marco dinámico que cambia de acuerdo a las variaciones temporales de las coordenadas y velocidades debido a los efectos anteriores.

Así, el **datum de la solución ITRF2000** quedó definido de la siguiente manera:

- Escala: Media ponderada de determinadas medidas VLBI y SLR de alta precisión.
- Origen: Media ponderada de determinaciones SLR (el centro de la órbita de los satélites).
- Orientación: Selección de determinadas estaciones ITRF de alta calidad geodésica que cumpla con los siguientes criterios:
 1. Que posea observaciones continuas al menos de los 3 últimos años.
 2. Localizado en plataforma rígida y lejos de zonas de deformación.
 3. Que se haya determinado la velocidad con una precisión mejor a 3mm/año.
 4. Que la velocidad sea menor a 3mm/año.

Basado en estos criterios, las 54 estaciones seleccionadas se pueden ver en la figura 14 como puntos azules.

Por último las rotaciones corresponderán a la solución ITRF97 en la época 1997.0 (que no serán más que las definidas en la orientación BIH para 1984.0) y sus variaciones se corresponderán con el modelo tectónico NNR-NUVEL-1A.

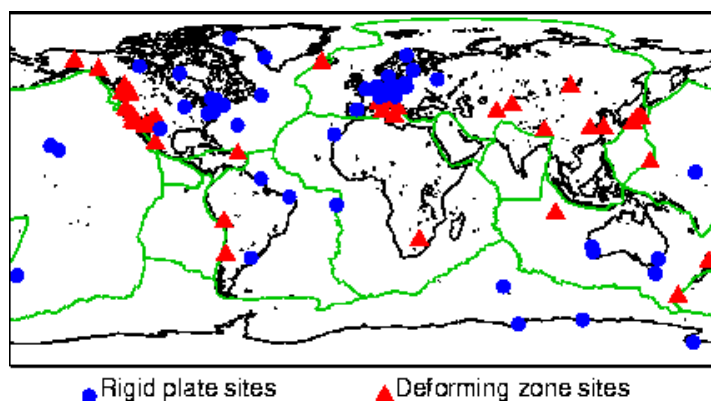


Figura 14: En azul se muestran los 54 puntos de la ITRF que cumplen con los 4 criterios y en rojo los que cumplen con los criterios 1, 3 y 4.

- Finalmente, en caso de necesitar coordenadas geodésicas, se utilizará el elipsoide GRS80.

El **datum de la solución actual ITRF2005**, basado únicamente en determinaciones SLR, VLBI, DORIS y GPS, figura 15, queda definido de la siguiente manera:

- Origen: Parámetros de traslación nulos en la época 2000.0 (variación nula respecto al origen definido en la época 2000.0) y variación nula de estos parámetros entre ITRF2005 y las series SLR.
- Escala: Factor de escala nulo para la época 2000.0 y variación nula entre ITRF2005 y las series VLBI.
- Orientación: Parámetros de rotación nulos para los ejes en la época 2000.0 y variaciones nulas entre ITRF2005 y ITRF2000.

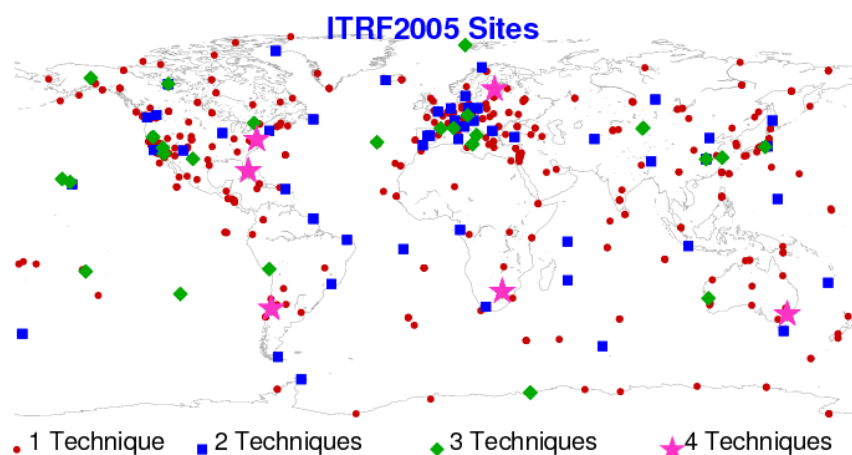


Figura 15: Estaciones que forman el ITRF2005 simbolizadas según el número de técnicas espaciales diferentes que utilizan.

Una de las principales diferencias entre los marcos 2000 y 2005 radica en una nueva estrategia de cálculo para las coordenadas GPS: para obtener una gran precisión de las coordenadas de un punto GPS es necesario conocer exactamente la posición del centro de fase tanto del satélite como de la antena receptora. La posición para la antena receptora se descompone en dos partes: un sesgo entre el centro de fase y el punto de referencia de la antena y una variación respecto a este sesgo, ya que el centro de fase no es algo fijo sino que depende de la elevación, acimut y la intensidad de la señal de los satélites. Normalmente los fabricantes dan las coordenadas (3D) del sesgo del centro de fase respecto al punto de referencia de la antena (normalmente la intersección de la vertical mecánica con la parte baja de la antena) y se considera que las variaciones a este sesgo son despreciables, por lo que se fijan a cero, a este esquema se le denomina correcciones relativas del centro de fase de la antena. Actualmente tanto los sesgos como las variaciones se pueden modelar, Seeber (2003), para los diferentes tipos de antena existentes en el mercado, esta modelización dependerá de la elevación y acimut de los satélites de los que recibe señal. El resultado final será una mejora en la precisión de las coordenadas determinadas en estas estaciones, a este esquema se le denomina correcciones absolutas del centro de fase de la antena.

2.5.1.- Marco de Referencia WGS84

Los valores expuestos en el apartado 2.4.1 son los actuales, pero en su origen diferían con ellos, por lo que los parámetros diferían con los adoptados por la ITRF; en base a estos resultados la U.S. Defense Mapping Agency (DMA) decidió reemplazar el valor de la constante KM original por el valor de la IERS y refinar las coordenadas de las 5 estaciones de control GPS (que forman el marco del sistema GPS) de manera que el marco WGS84 se alinea con el ITRF (que es más preciso), realizando esta alineación de forma periódica, figura 16



Figura 16: Localización de las 5 estaciones de control originales que formaban el marco del sistema WGS84.

La primera versión actualizada y revisada del WGS84, válida desde el 2 de Enero de 1994, se llamó WGS84(G730), donde G indica que las coordenadas se han obtenido con GPS y 730 es la semana GPS cuando la DMA implementó el sistema refinado.

En 1996, la U.S. National Imagery and Mapping Agency (NIMA), sucesora de la DMA, implementó una nueva versión refinada del marco que llamó WGS84(G873), válida desde el 29 de Septiembre de 1996. Este marco queda materializado por las coordenadas de las 5 estaciones de control anteriores, figura 16.

Para su alineación con el marco ITRF94 se fijaron las coordenadas de 13 estaciones ITRF94 en el proceso de cálculo y ajuste de las coordenadas WGS84(G873),

finalmente los marcos ITRF94, para la época 1997.0 y WGS84(G873) presentan diferencias menores a los 2 cm.

Los refinamientos anteriores afectan a la precisión de las coordenadas del marco, pero no cambian la definición original del sistema WGS84 (que sigue reteniendo el valor original para la constante KM).

Actualmente existe un nuevo refinamiento, WGS84(G1150), ya que las estaciones de referencia han aumentado de 5 a 16: 10 de la fuerza aérea Norteamericana y 6 de la NIMA, figura 17; después de alinear esta actualización al marco ITRF2000, fijando para el cálculo de las coordenadas WGS84 49 estaciones ITRF, las diferencias entre WGS84(G1150) e ITRF2000 indican que se trata de marcos virtualmente idénticos.

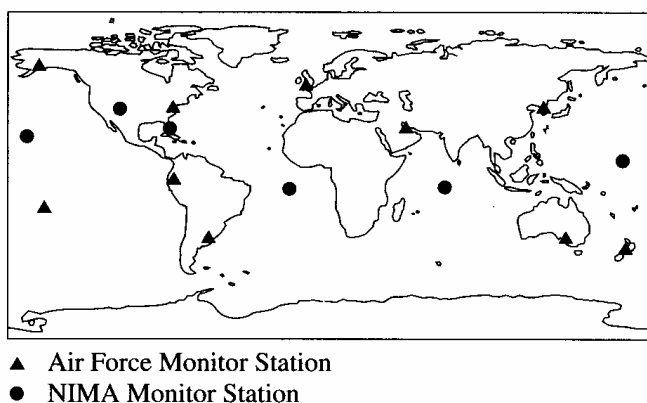


Figura 17: Marco actual del sistema WGS84.

2.5.2.- Marco de Referencia I.G.S.

Otra realización del ITRS es el marco I.G.S. (Internacional GNSS Service), Ray et al. (2004), Benciolini et al. (2008). IGS es un organismo compuesto por más de 200 agencias de todo el mundo que comparten recursos y datos de estaciones GPS o GLONASS permanentes de todo el mundo con el fin de generar productos GNSS de alta precisión (órbitas de los satélites de las constelaciones GNSS, estado de los relojes de los satélites, parámetros de rotación terrestres, etc.).

Este marco está compuesto por cerca de 400 estaciones, Figura 18, que cuentan únicamente con la técnica espacial GPS o GLONASS, es por esto que si se utilizan únicamente las observaciones de estas estaciones se puede formar un marco (el marco IGS) de referencia que será más consistente que el ITRF ya que no utiliza ni mezcla observaciones de otras técnicas espaciales, con esto no se quiere decir que sea un marco más preciso que el marco ITRF. El marco IGS se alinea al marco ITRF mediante una transformación Helmert utilizando estaciones de alta calidad (99 para el marco IGSb00 y 132 para el IGS05), por lo que podemos encontrar coordenadas para una misma estación en los dos marcos de referencia, IGS e ITRF, que pueden llegar a variar algunos milímetros.

La primera realización fue la IGS00 (alineada al marco ITRF00 mediante 54 estaciones de alta calidad), realización actualizada rápidamente a la IGSb00. Después de la realización del ITRF2005 el 5 de Noviembre de 2006 se realizó la IGS05 (caracterizada por la adopción de los modelos absolutos de calibración de las antenas de los receptores).

Los usuarios GNSS que utilicen productos IGS (órbitas, parámetros de rotación de la Tierra, etc.) en sus cálculos, estarán obteniendo las coordenadas finales de sus estaciones en el marco IGS (actualmente en el IGS05), por lo tanto será el marco específico para usuarios GPS.

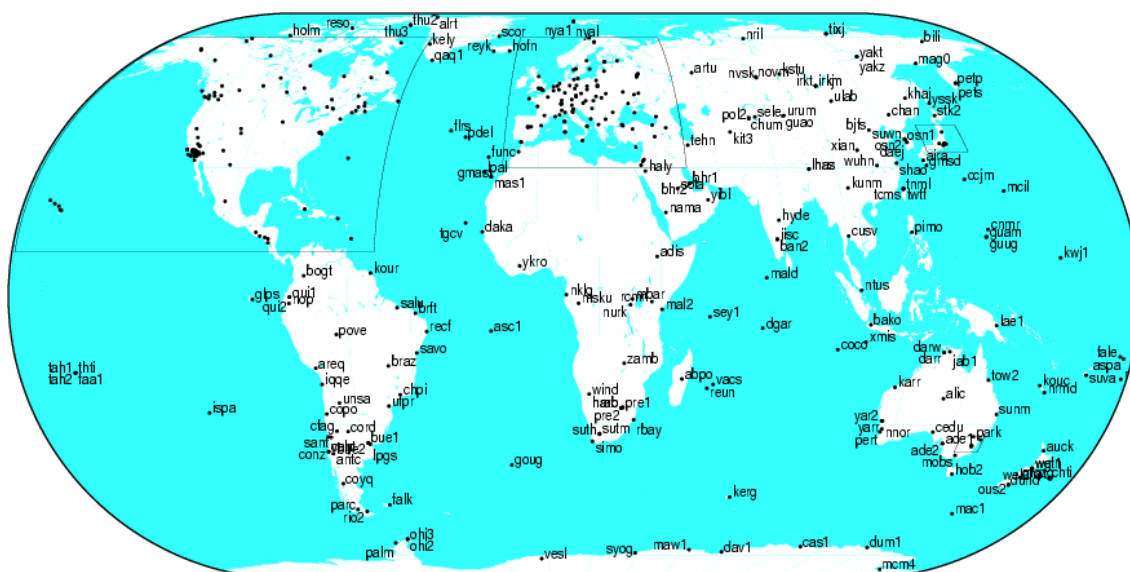


Figura 18: Marco IGS.

Por último, las actualizaciones del marco ITRF se producen aproximadamente cada 5 años, lo que provoca que la propagación de las coordenadas sea problemática en caso de discontinuidades (velocidades no lineales, cambios de instrumentación, etc.), mientras que el marco IGS se actualiza cada semana y se distribuye en dos productos:

- a) Estimaciones semanales del marco referidas a la posición central de cada semana (producto muy interesante para el estudio de procesos con variación temporal no lineal).
- b) Actualizaciones semanales del marco IGS. El actual IGS05 se referidas a la época 2000.

2.5.3.- Sistema y Marco de Referencia Terrestre Europeo (ETRF89)

El sistema de referencia es el mismo que el ITRS89, lo que cambia es el concepto de marco.

Dado que, sobre la parte estable de Europa, la precisión de las posiciones individuales se encontraba ya en algunos pocos centímetros en X, Y y Z en 1989, se decidió que las coordenadas ITRF89 de las 36 estaciones europeas definieran el Marco de Referencia Terrestre Europeo (ETRF89), figura 19, el cual rota con la parte estable de la placa euroasiática y es coincidente con el ITRF en la época 1989.0. Esto quiere decir que, al ajustar el marco a los movimientos de la placa, las coordenadas de las estaciones que forman el marco serán siempre iguales (al margen de posibles pequeños movimientos producidos por causas locales), en la tabla 1 se puede ver, a modo de ejemplo, la coordenada Y del observatorio astronómico de Robledo (Madrid), donde podemos ver que las coordenadas ITRF varían en las sucesivas determinaciones, correspondiendo esta variación a la velocidad determinada, mientras que las coordenadas en ETRF89 son constantes. Como se desprende de esta tabla a cada determinación ITRF(año) le corresponde una ETRF89(año), o simplemente ETRF(año). Actualmente la IERS pretende actualizar el marco de referencia

aproximadamente cada cinco años, esto puede producir saltos en las coordenadas de las estaciones y discontinuidades que pueden llevar a cierto grado de confusión (por ejemplo, se ha constatado un salto en el eje Z entre ITRF2000 e ITRF2005 de 1.8 mm/año), evidentemente estos saltos pasarán a la definición ETRF del año correspondiente. Para evitar esto se recomienda no utilizar el ETRF2005, sino que se debe adoptar el ETRF2000 como marco de referencia convencional definitivo, de todas formas, para poder aprovechar las precisiones del marco ITRF2005 se recomienda que todas las estaciones europeas que posean solución en el marco ITRF2005 se expresen en el marco ETRF2000, llamando a estas coordenadas ETRF2000(R05). Esta decisión se adoptó, además, para armonizar las futuras realizaciones del sistema ETRS89, estableciendo así un único marco de forma convencional común para toda Europa.

El marco de referencia se ha ido densificando poco a poco sobretodo gracias a las determinaciones GPS. En 1990 se añadieron 30 estaciones más a las originales, desde entonces se han ido introduciendo estaciones, sobretodo de Europa del Este. Actualmente cerca de 90 forman la red EUREF permanente, figura 20.

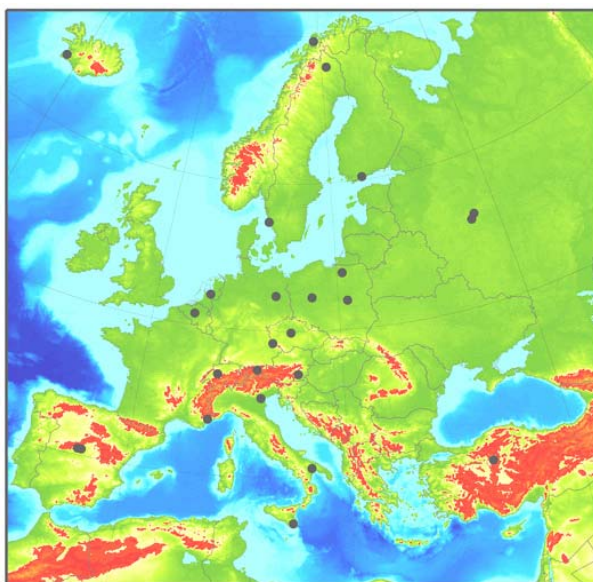


Figura 19: Estaciones originales del marco ETRF89.

Tabla 1: Coordenada Y y su velocidad (VY) del observatorio astronómico de Robledo en el marco ITRF en sus diferentes definiciones y épocas de referencia y en el marco ETRF89 en diferentes épocas de referencia.

COORDENADA Y/VY			
ITRF00 ₉₇	-360488.791±0.001	ETRF89 ₀₀	-360488.895±0.001
	0.0196±0.0002		-0.0006±0.0002
ITRF97 ₉₇	-360488.783±0.002	ETRF89 ₉₇	-360488.899±0.003
	0.0197±0.0003		-0.0004±0.0004
ITRF96 ₉₇	-360488.779±0.003	ETRF89 ₉₆	-360488.898±0.003
	0.0201±0.0004		-0.0008±0.0004
ITRF94 ₉₃	-360488.862±0.007	ETRF89 ₉₄	-360488.898±0.009
	0.0193±0.0015		-0.0000±0.0015
ITRF93 ₉₃	-360488.859±0.003	ETRF89 ₉₃	-360488.895±0.003
	0.0193±0.0004		-0.0001±0.0004
ITRF92 ₈₈	-360488.958±0.005	ETRF89 ₉₂	-360488.898±0.005
	0.0203±0.001		-0.0001±0.0010

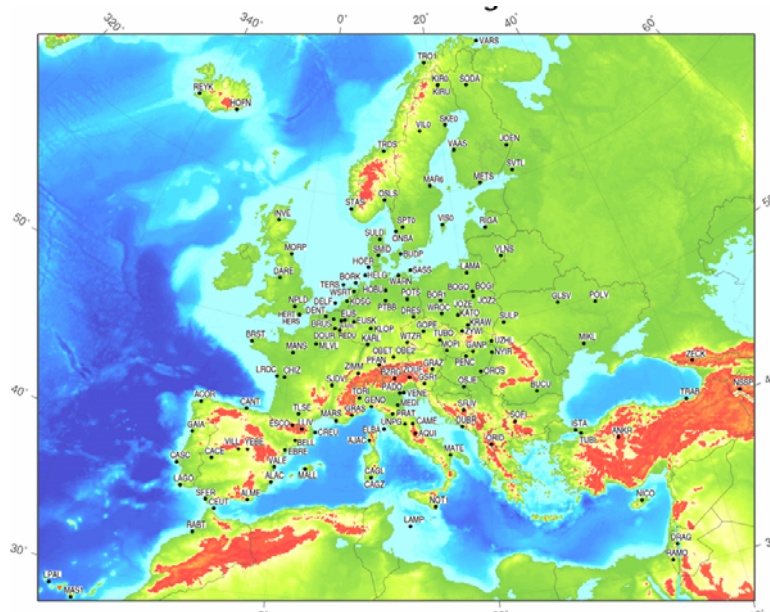


Figura 20: Estaciones EUREF que forman el marco ETRF89 en la actualidad.

Con el real decreto 1071/2007 del 27 de Julio de 2007 por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial, se pone fecha de 1-1-2015 a la adopción oficial del sistema ETRS89 en toda la cartografía y Bases de datos de información geográfica y cartográfica producida o actualizada por las administraciones públicas en España, por lo que cualquier profesional relacionado con la cartografía, la topografía y la geodesia debe ser perfecto conocedor de ese sistema de referencia y como obtener coordenadas en el mismo.

BIBLIOGRAFIA

Benciolini B., Biagi L., Crespi M., Manzano A.M., Roggero M. (2008): *Referente frames for GNSS positioning services: some problems and proposed solutions*. Journal of Applied Geodesy, 2, pp 53-62.

<ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub>

Hofmann-wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001): *GPS Theory and Practice, 5th edition*. Ed. SpringerWienNewYork.

<Http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF>

<Http://www.iers.org>

<Http://www.obspm.fr>

Lambeck K. (1986): *The Earth's Variable rotation: some geophysical causes*. The Earth's rotation and reference frames for geodesy and geodynamics. IAU symposium n° 128, 1-20.

McCarthy D. (2000): IERS Conventions (2000). IERS Technical Note. International Earth Rotation Service.

Moritz H. (1984): *Geodetic Reference System 1984*. Bulletin Géodésique, n° 58, 187-192.

- Moritz H. (1984): *Sistemas de referencia en geodesia*. Cursos de geodesia superior, cursos y seminarios n°1. IGN. IAG. Madrid, 1-44.
- Mueller J. (1988): *Reference coordinate systems: an update*. Ohio State University Report n° 394.
- Ray J., Dong, D., Altamimi Z. (2004): *IGS reference frame: status and future improvements*, dentro de: Proceedings of IGS: Celebrating a decade of the International GPS Service, Berna, 1-5 de marzo de 2004.
- Rodríguez E., Catarla J.L. (1999): *IBERIA95: Red Peninsular de Orden Cero*. Publicación técnica n° 30, Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.
- Seeber G. (2003): *Satellite Geodesy, 2nd edition*. Ed. Walter de Gruyter.
- Sevilla M.J. (2003): *Actualización de cálculos astronómicos*. Cursos y seminarios n° 8. Instituto de Astronomía y Geodesia. CSIC. UCM.
- Torge W. (2001): *Geodesy, 3rd edition*. Ed. Walter de Gruyter.
- World Geodetic System 1984* (1991). DMA Technical Report.