

LA GEORREFERENCIACIÓN EN CARTOGRAFÍA

Rubén Carlos RAMOS

La topografía es la ciencia que permite representar una parte de la superficie terrestre en un documento denominado carta topográfica, confeccionado a una determinada escala y equidistancia de acuerdo a las necesidades técnicas a satisfacer. Entendiendo por documento a todo aquello que da fe de algo, la carta es un documento pues da fe de la forma del terreno y de la ubicación planimétrica y altimétrica de todos y cada uno de los elementos del terreno representados en ella.

Un detalle del terreno de coordenadas geográficas conocidas, se encontrará representado en la carta topográfica a través de un símbolo cartográfico y ubicado en la misma por medio de coordenadas planas.

Esta correspondencia biunívoca entre coordenadas geográficas en el terreno y coordenadas planas en la carta, constituye un Sistema de Representación Cartográfica. Esto significa que a cada punto del terreno de coordenadas geográficas latitud φ y longitud λ le corresponderá en la carta uno y solo un punto de coordenadas planas x e y , y viceversa.

Para transformar coordenadas geográficas del terreno en planas de la carta, lo hacemos a través de un sistema de representación cartográfica. Dicho sistema permite también la transformación inversa.

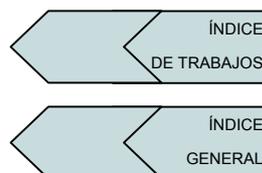
Como vemos, cada vez que nos referimos a la ubicación de un punto en el terreno lo hacemos por medio de coordenadas geográficas y cuando se trata de su ubicación en la carta hablaremos de coordenadas planas.

Las coordenadas geográficas se encontrarán en un SISTEMA DE REFERENCIA y las coordenadas planas en un SISTEMA DE REPRESENTACION CARTOGRAFICA.

Por lo tanto, debemos relacionar al Sistema de Referencia con el terreno y al Sistema de Representación Cartográfico con la carta.

El Sistema de Representación Cartográfica utilizado por nuestro país se denomina Gauss-Krüger.

El Sistema de Referencia nacional actual se denomina WGS 84.



LA GEORREFERENCIACIÓN EN CARTOGRAFÍA

Rubén Carlos RAMOS

PLANIMETRIA

CONCEPTOS GENERALES

La topografía es la ciencia que permite representar una parte de la superficie terrestre en un documento denominado carta topográfica, confeccionado a una determinada escala y equidistancia de acuerdo a las necesidades técnicas a satisfacer. Entendiendo por documento a todo aquello que da fe de algo, la carta es un documento pues da fe de la forma del terreno y de la ubicación planimétrica y altimétrica de todos y cada uno de los elementos del terreno representados en ella.

Un detalle del terreno de coordenadas geográficas conocidas, se encontrará representado en la carta topográfica a través de un símbolo cartográfico y ubicado en la misma por medio de coordenadas planas.

Esta correspondencia biunívoca entre coordenadas geográficas en el terreno y coordenadas planas en la carta, constituye un Sistema de Representación Cartográfica. Esto significa que a cada punto del terreno de coordenadas geográficas latitud ϕ y longitud λ le corresponderá en la carta uno y solo un punto de coordenadas planas x e y , y viceversa.

Para transformar coordenadas geográficas del terreno en planas de la carta, lo hacemos a través de un sistema de representación cartográfica. Dicho sistema permite también la transformación inversa.

Como vemos, cada vez que nos referimos a la ubicación de un punto en el terreno lo hacemos por medio de coordenadas geográficas y cuando se trata de su ubicación en la carta hablaremos de coordenadas planas.

Las coordenadas geográficas se encontrarán en un SISTEMA DE REFERENCIA y las coordenadas planas en un SISTEMA DE REPRESENTACION CARTOGRAFICA.

Por lo tanto, debemos relacionar al Sistema de Referencia con el terreno y al Sistema de Representación Cartográfica con la carta.

El Sistema de Representación Cartográfica utilizado por nuestro país se denomina Gauss-Krüger.

El Sistema de Referencia nacional actual se denomina WGS 84.

¿QUÉ ES UN SISTEMA DE REFERENCIA?

Ya quedo establecido que cuando hablamos de coordenadas geográficas de puntos del terreno, lo hacemos en un determinado Sistema de Referencia. Pero cabe una pregunta: ¿Qué es un Sistema de Referencia?. La respuesta es: una terna de ejes cartesianos ortogonales $X Y Z$, cuyo origen O se encuentra ubicado en el centro geométrico del elipsoide de representación matemática de la Tierra. No debemos confundir X e Y cartesianas ortogonales con x e y planas. Las primeras son cartesianas ortogonales y se encuentran en un Sistema de Referencia y las segundas son planas y se encuentran en un Sistema de Representación Cartográfica.

Como sabemos, la Tierra se encuentra ligeramente achatada en los Polos y ligeramente ensanchada en el Ecuador y la forma matemática que mejor la representa es la del elipsoide de revolución.

Si conocemos el valor del semieje mayor del elipsoide y su achatamiento, podremos definir su forma y dimensiones y hallar el resto de sus parámetros. Si al elipsoide le incorporamos una red de meridianos y paralelos, podremos establecer las relaciones matemáticas entre las coordenadas geográficas elipsoidales y las cartesianas ortogonales, y pasar de unas a otras a través de las mismas.

Así, la Tierra quedará representada por un elipsoide de revolución de determinada forma y dimensiones, y los puntos del terreno estarán referenciados ya sea por coordenadas cartesianas ortogonales XYZ o por coordenadas geográficas elipsoidales $\phi \lambda h$. En la carta ubicaremos a los mismos por coordenadas planas x e y .

EL ELIPSOIDE DE HAYFORD

Las diversas mediciones de arco de meridiano terrestre, demostraron que el globo terrestre era representable por un elipsoide, pero aparecieron discrepancias en lo concerniente a las dimensiones que se debía asignarle. Se recurrió entonces a compensar los datos existentes por el método de mínimos cuadrados que hacia 1806 había ideado el matemático francés Adrien Marie Legendre.

En 1841 el astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel creó el elipsoide que lleva su nombre utilizando las mediciones de diez meridianos europeos. En 1880 y 1886 hizo lo propio A.R. Clarke, usando otros grupos de arcos de meridiano integrados por la medición de Perú y por mediciones hechas en Rusia y en la India. Cada científico produjo un elipsoide de referencia, que se conoció con su nombre y se usó como tal durante cierto tiempo en las tareas geodésicas.

Otro elipsoide que prestó grandes servicios fue propuesto en 1909 por el geodesta norteamericano J. Hayford. Para su propósito, Hayford se valió de la triangulación norteamericana y obtuvo un elipsoide cuyo radio ecuatorial resultó ser de 6.378.388 m y cuyo achatamiento resultó ser de 1/297. En la Asamblea de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional del año 1924, en Madrid, se resolvió aceptar como elipsoide de referencia al encontrado por Hayford en 1909 (Elipsoide Internacional de 1924). Estas resoluciones tuvieron vigencia hasta el advenimiento de las modernas técnicas satelitarias.

LOS SISTEMAS LOCALES

Una vez determinada la forma y dimensiones del elipsoide de revolución representativo de la Tierra, debemos ubicarlo en relación a la misma. Podemos hacerlo de manera que el elipsoide de revolución sea tangente al geoide en un punto del terreno.

Cabe aquí la siguiente pregunta ¿ Qué es el geoide ?. Es la superficie del campo de gravedad terrestre que coincide sensiblemente con el nivel medio del mar. Existen infinitas superficies del campo de gravedad terrestre y la propiedad física que poseen es que la dirección de la plomada en todos sus puntos es perpendicular a los mismos.

Cuando verticalizamos un instrumento en un punto del terreno lo hacemos en dirección a la línea de la plomada que pasa por el mismo (en la dirección de la vertical del lugar). Al atravesar infinitas superficies del campo de gravedad, la dirección de la plomada se va curvando, hasta llegar al geoide. La medida de esa línea curva representa la altura del punto del terreno respecto del geoide.

Por otro lado, podemos trazar la perpendicular al elipsoide que pasa por el punto del terreno, comúnmente denominada normal al elipsoide.

Cuando colocamos el elipsoide de revolución tangente al geoide en un punto del terreno, la vertical al geoide será coincidente con la normal al elipsoide en dicho punto. Este punto de tangencia elipsoide-geoide será el origen de las mediciones o punto dátum.

Un Sistema de Referencia Local se crea disponiendo de los siguientes tres elementos:

- a) Coordenadas del Punto Dátum. En dicho punto la normal al elipsoide es coincidente con la vertical del lugar.
- b) Elipsoide de Referencia. El mismo queda definido cuando se conocen dos de sus parámetros, en general se utilizan el semieje mayor (a) y el achatamiento (f).
- c) Orientación del elipsoide. Se logra estableciendo un azimut de origen en el punto dátum.

Para la creación de Sistemas de Referencia, el Instituto Geográfico Militar de Argentina adopta mediante la Disposición Permanente Nro 197 del 24 de abril de 1925 al Elipsoide Internacional de 1924, y como Sistema de Representación Cartográfica la de Gauss-Krüger.

En el punto dátum establecido se realiza una observación astronómica de precisión para la determinación de las coordenadas geográficas astronómicas, que serán coincidentes con las coordenadas geográficas elipsoidales pues la vertical del lugar es coincidente a la normal al elipsoide en dicho punto.

La triangulación era el método geodésico utilizado para dar coordenadas geográficas elipsoidales a puntos del terreno materializados, a partir del dátum establecido .

Numerosos fueron los sistemas de referencia locales utilizados por el Instituto Geográfico Militar de Argentina para la confección de cartografía. Podemos citar:

- **Sistema Castelli** : englobó en forma provisional todos los trabajos geodésicos ejecutados hasta 1948 en las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Corrientes, Misiones, Córdoba, Mendoza y San Juan. Este sistema toma como dátum a la estación astronómica ubicada en el extremo SE de la base Castelli en la provincia de Buenos Aires.
- **Sistema Yaví**: en Jujuy.
- **Sistema Chos Malal**: en Neuquén.
- **Sistema Pampa del Castillo**: en la zona militar de Comodoro Rivadavia, no conectada al sistema Castelli.
- **Sistema Ubajay**: superpuesto con el sistema Castelli, que corresponde a la cadena internacional desarrollada sobre el río Uruguay.

Después de 1943, se realizaron otros Sistemas Locales:

- **Sistema Tapi Aike**: en Santa Cruz (1944-1945).
- **Sistema Huemules**: en Chubut y Santa Cruz (1945-1947).
- **Sistema Carranza o Chumbicha**: en Catamarca (1952).
- **Sistema 25 de mayo**: en San Juan (1961-1962)

Todos los sistemas de referencia locales mencionados precedentemente, fueron ejecutados por el Instituto Geográfico Nacional. Existen también, otros sistemas locales realizados por otras instituciones y organismos, que merecen mencionarse por la calidad de los trabajos realizados:

- **Sistemas Aguaray, Quiñi Huao, Tapi Aike, Pampa del Castillo**: de Yacimientos Petrolíferos Fiscales.
- **Sistemas costeros del Servicio de Hidrografía Naval.**
- **Sistemas de las Comisiones Argentinas Demarcadoras de Límites Internacionales**: sobre las fronteras con Chile, Bolivia y Paraguay.
- **Sistema Uspallata**: del Instituto de Geodesia de la Universidad de Buenos Aires.

A la hora de superponer cartografía de dos zonas contiguas con dos Sistemas Locales distintos, se producen desplazamientos (corrimientos) en los puntos del terreno comunes a las mismas. Como se puede apreciar, esto se debe a que como los dátums son diferentes, los puntos comunes a ambas zonas (puntos límite) tienen coordenadas geográficas distintas en ambos sistemas locales.

El Sistema de Referencia Local utilizado se adapta bien al geoide en las inmediaciones del punto dátum, pero a medida que nos alejamos del mismo aumenta la probabilidad que esta adaptación disminuya. Por esta razón, el Sistema de Referencia creado es Local, ya que sólo es confiable en las inmediaciones del dátum.

EL SISTEMA DE REFERENCIA NACIONAL CAMPO INCHAUSPE

El Sistema de Referencia Campo Inchauspe permitió integrar los Sistemas Locales, estableciéndose un único Sistema de Referencia para la Argentina. El Instituto Geográfico Militar emite el 30 de noviembre de 1946 la Disposición Permanente Nro. 440, en la que se pone de manifiesto la necesidad de la creación de un Sistema de Referencia Nacional.

El Sistema Campo Inchauspe tuvo dos versiones:

- **Sistema Campo Inchauspe 1954.**
- **Sistema Campo Inchauspe 1969.**

El **Sistema Campo Inchauspe 1954** adopta como dátum al punto ubicado en la intersección del paralelo 36° Sur con el meridiano 62° Oeste, cerca de Pehuajó-Provincia de Buenos Aires y su elipsoide asociado es el Internacional de 1924.

Comprendió 10 polígonos de triangulación que fueron compensados manualmente.

El **Sistema Campo Inchauspe 1969** adopta el mismo dátum que el sistema anterior, pero sus coordenadas astronómicas fueron recalculadas, reduciéndose al Origen Convencional Internacional (O.C.I.) de acuerdo a la recomendación de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (U.G.G.I.) en su asamblea del año 1967. El corrimiento del dátum del Sistema Campo Inchauspe 1969 respecto del dátum del Sistema Campo Inchauspe 1954 fue de 0,6 m en latitud y 1,5 m en longitud.

Se realizó luego una compensación general de los 19 polígonos de triangulación que se encontraban medidos, a los que se adicionaron inmediatamente otros 16. Esta Red Fundamental de puntos de I y II orden se fue densificando con puntos de III y IV orden.

La Red Fundamental se desarrolla a través de cadenas de triangulación que siguen aproximadamente los meridianos y paralelos pares (cadenas de triangulación meridianas y paralelas). Una Unidad Geodésica está delimitada por dos cadenas meridianas y dos cadenas paralelas. Su relleno se denomina Malla y constituye la densificación de la Unidad Geodésica.

El Sistema de Referencia Campo Inchauspe 1969 está compuesto de 8.050 puntos de I y II orden y 14.186 puntos de III y IV orden, que hacen un total de 22.236 puntos, uniformemente distribuidos en todo el territorio nacional.

La comparación de la Red Campo Inchauspe 1969 con Redes Satelitales de precisión superior, permitió establecer una precisión de sus lados de triangulación del orden de 3 a 10 ppm (partes por millón). Una precisión de 1 ppm significa conocer una distancia de 1 km de longitud con una precisión de 1 mm.

La siguiente tabla nos muestra los corrimientos entre las coordenadas planas del Sistema Campo Inchauspe 1969 y algunos Sistemas Locales, en puntos comunes a ambos sistemas. Los valores son promedios de carácter indicativo y están expresados en metros.

SISTEMA	ΔX	ΔY
Yavi	102	89
Carranza	-152	-235
Castelli, Buenos Aires	-21	10
Castelli, Corrientes - Entre Ríos	-19	3
Castelli, Mendoza	-25	-4
25 de Mayo	-364	-178
Ubajay	84	-58
Chos Malal	-50	-153
Pampa del Castillo	-26	128

LOS SISTEMAS DE REFERENCIA MUNDIALES

A partir de los años 60 se han desarrollado un gran número de Sistemas de Referencia Mundiales. Estos Sistemas de Referencia poseen las siguientes características generales:

- Toman como origen de la terna de ejes cartesianos ortogonales al centro de masas de la Tierra.
Tienen en cuenta el movimiento de los Polos Terrestres y de rotación terrestre, que no pueden ser modelizados. El eje de rotación de la Tierra presenta movimientos (los mas significativos son los de Precesión y Nutación) que producen un desplazamiento de los polos terrestres.

- Poseen un conjunto de constantes asociadas y en particular una fórmula de gravedad en el elipsoide de referencia.
Desaparece el concepto de punto dátum. Es reemplazado por el origen de la terna de ejes cartesianos ortogonales y su orientación espacial.

El **Standard Earth 1966** fue el primer Sistema de Referencia Mundial obtenido con la ayuda de satélites artificiales. Fue desarrollado por el Smithsonian Astrophysical Observatory y es el resultado de 100.000 observaciones provenientes de satélites de observación fotográfica; los satélites a flash tipo Anna que emiten una señal luminosa en instantes prefijados y los satélites de tipo Echo y Pageos que son reflectores de la luz solar.

Las estaciones de observación estaban equipadas con cámaras fotográficas Baker Nunn. Una de las doce estaciones primarias a partir de las cuales fue desarrollado el citado Sistema de Referencia, se encontraba instalada en Villa Dolores - Córdoba y fue operada por el observatorio Astronómico de la Universidad de Córdoba desde 1958 hasta 1965 en que fue trasladada a Comodoro Rivadavia. Las observaciones realizadas desde el nuevo emplazamiento fueron utilizadas en el Sistema de Referencia **Standard Earth 1969**.

El **Sistema de Referencia NWL - 9D** permitió a la República Argentina sumarse a los Sistemas de Referencia Mundiales, al realizar en el año 1977 mediciones satelitarias Doppler sobre 19 puntos de la Red Campo Inchauspe 1969 con satélites de la serie Transit. Al disponerse de coordenadas en los dos Sistemas de Referencia, pudieron determinarse las constantes de transformación entre NWL - 9D y Campo Inchauspe 1969.

Los **Sistemas de Referencia WGS (World Geodetic System - Sistema Geodésico Mundial)** fueron desarrollados por la DMA (Defense Mapping Agency - Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos) para apoyo de su cartografía.

Los antecesores del Sistema de Referencia Mundial WGS 84 fueron:

- **Sistema de Referencia WGS 60**
- **Sistema de Referencia WGS 66**
- **Sistema de Referencia WGS 72**

Al conocerse las constantes de transformación entre los Sistemas NWL - 9D y WGS 72, se calcularon los desplazamientos en X,Y,Z en coordenadas geocéntricas ortogonales entre WGS 72 y Campo Inchauspe 1969, lo que permitió disponer de coordenadas de puntos de esta Red en los sistemas de referencia mundiales citados.

El **Sistema de Referencia WGS 84** es un Sistema Convencional Terrestre (CTS) que presenta las siguientes características:

- El origen de coordenadas **X Y Z** es el centro de masas de la Tierra.
- El eje **Z** pasa por el polo convencional terrestre (CTP) definido por el Bureau International de la Hora (BIH) para la época 1984.0.
- El eje **X** es la intersección entre el meridiano origen de longitudes definido por el BIH para la época 1984.0 y el plano del ecuador CTP.
- El eje **Y** completa con los ejes anteriores una terna derecha de ejes fijos a la Tierra, está en el Ecuador, a 90° al este del eje **X**.
- El origen de la terna así definida sirve además de centro geométrico del elipsoide **WGS 84**, y el eje **Z** es su eje de revolución.
- El semieje mayor (**a**) del elipsoide 1984 mide 6378137 metros.
- El achatamiento (**a-b**)/**a** siendo **b** el semieje menor, es 1/298.257223563.

Entre otras constantes asociadas, se encuentra el valor de la constante de Gravitación Universal $GM = 3986005 \times 10^8 \text{m}^3 \text{s}^{-2}$.

El **Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS)** es un producto del IERS (International Earth Rotation Service - Servicio de Rotación Terrestre Internacional). Dicho organismo comenzó a funcionar a partir del año 1988.

Dicho Sistema posee las siguientes características:

- El origen de coordenadas **X Y Z** es el centro de masas de la Tierra.
- El eje **Z** pasa por un polo medio.
- El eje **X** se encuentra en el plano del Ecuador Terrestre, dirigido al origen de las longitudes (común con el usado tradicionalmente próximo a la localidad de Greenwich).
- El eje **Y** completa con los ejes anteriores una terna derecha de ejes fijos a la Tierra, está en el Ecuador, a 90° al este el eje X.

LOS MARCOS DE REFERENCIA

Los Marcos de Referencia son las redes de puntos de los Sistemas de Referencia.

Los Marcos de Referencia clásicos, tales como los que materializan a los Sistemas de Referencia Locales y Nacionales, son estables ya que las coordenadas de sus puntos permanecen invariables con el transcurrir del tiempo. Son bidimensionales, ya que no se cuenta con alturas elipsóidicas o geodésicas. Las alturas se encuentran referidas al geoide y no se conoce con suficiente precisión el valor de las ondulaciones geoidales para convertirlas a geodésicas. Es por ello que se aconseja la medición GPS en puntos de las líneas de nivelación, con vistas a mejorar el conocimiento de la posición del geoide respecto del elipsoide y de la precisión en la transformación de alturas elipsóidicas a alturas referidas al geoide.

Los Marcos de Referencia modernos, tales como los que materializan a los Sistemas de Referencia Mundiales, son activos ya que las coordenadas de sus puntos varían con el transcurrir del tiempo debido a que los mismos presentan desplazamientos en el terreno producto del movimiento de las placas en que se encuentra fragmentada la corteza terrestre. La posibilidad que brinda la tecnología satelitaria de determinar la velocidad de desplazamiento de los puntos hacen que el marco de referencia se mueva. Son tridimensionales, ya que se dispone de latitud, longitud y altura geodésicas.

EL MARCO DE REFERENCIA ITRF

El Marco de Referencia ITRF (International Terrestrial Reference Frame - Marco de Referencia Terrestre Internacional), es la Red de puntos que materializan el Sistema ITRS.

Consta de aproximadamente 180 puntos uniformemente distribuidos en la Tierra y medidos por distintas técnicas geodésicas, como VLBI (dos puntos terrestres separados miles de kilómetros receptionan señales de fuentes distantes como los cuásars, determinándose por interferometría la distancia que los separa), TELEMETRIA LASER (estaciones terrestres emiten señales láser a satélites artificiales o a la Luna, cuya ubicación se conoce con precisión. Los satélites devuelven la señal y se registra el tiempo de ida y vuelta de la misma, determinándose la distancia entre las estaciones terrestres), BALIZAS DORIS (balizas en Tierra emiten señales de radiofrecuencia que permiten el posicionamiento relativo) y GPS.

Todos los años se miden los puntos de la Red ITRF, pudiéndose incorporar mas puntos en cada medición anual y mejorar la precisión del conjunto. Surge así el ITRF 92 (medición del año 1992), ITRF 94 (medición del año 1994), etc. Además se debe precisar la época de medición, como por ejemplo 1993.5 (mediados de año de 1993). Si decimos que las coordenadas son ITRF 94 - época 1995.4 significa que hemos tomado la red del año 1994 con coordenadas referidas a la época 1995.4. Para la conversión de la medición a una determinada época, es necesario conocer la magnitud del desplazamiento de los puntos medidos conforme transcurre el tiempo, que se logra a través de las citadas mediciones anuales de la Red ITRF.

EL MARCO DE REFERENCIA POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas)

Es la Red Satelital de la República Argentina.

EL MARCO DE REFERENCIA POSGAR 94

El proyecto POSGAR aparece en el año 1989 y se ejecuta entre 1993 y 1994. En su medición participa personal del Instituto Geográfico Militar de Argentina, contando con la colaboración del Servicio de Hidrografía Naval.

El procesamiento fue realizado por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad de La Plata (FCAG-UNLP), calculándose las observaciones con el programa comercial GPPS y el ajuste final mediante un programa de ajuste de redes desarrollado por la citada Facultad. Las coordenadas definitivas fueron dadas a conocer en 1995. La denominación del Marco de Referencia es **POSGAR 94**.

Consta de 127 puntos distanciados entre sí aproximadamente 200 km, 23 de los cuales pertenecen a la **Red CAP** (Central Andes Project - Proyecto Andes Centrales). El Proyecto CAP surge del acuerdo firmado entre UNAVCO (Consortio de Universidades de los Estados Unidos de América) y el Instituto Geográfico Militar de Argentina, y consiste en la medición GPS de puntos en forma periódica para observar el desplazamiento de placas tectónicas.

El procesamiento de la Red POSGAR 94 se apoyó en 19 puntos de la Red CAP y un punto DORIS del Instituto Geográfico Nacional de Francia. Las coordenadas geocéntricas de estos puntos que se encontraban apoyados en ITRF 92 época 1993.8, fueron transformados a WGS 84. POSGAR 94 materializa al Sistema de Referencia WGS 84 en la Argentina.

Por Disposición Nro 13/97 de mayo de 1997, el Director del Instituto Geográfico Militar de Argentina dispuso adoptar POSGAR 94 como Marco de Referencia Geodésico Nacional.

CONVERSIÓN DE COORDENADAS CAMPO INCHAUSPE 1969 A POSGAR 94

La conversión se puede realizar utilizando las fórmulas de Molodensky, que piden ingresar como dato las diferencias entre los semiejes mayores de los elipsoides asociados a ambos sistemas y de sus achatamientos, así como los desplazamientos de las coordenadas geocéntricas ΔX , ΔY , ΔZ denominadas constantes de transformación. Dichas constantes fueron determinadas por la DMA de los EEUU y permiten realizar la transformación con un error de 5 m.

Otra forma de realizar dicha conversión es la utilización de las Fórmulas de Regresión Múltiple, que permiten absorber parte de los errores sistemáticos del Sistema Campo Inchauspe 1969, lográndose una conversión con un error de 1,5 m.

EL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS

Esta Red se encuentra constituida por 50 puntos distribuidos uniformemente en Sudamérica. Fueron medidos en mayo/junio de 1995, 10 de los cuales pertenecen a la Argentina y 6 son coincidentes con puntos de la Red POSGAR 94, lo que permitió determinar que las coordenadas relativas de POSGAR 94 presentan diferencias por debajo de 1 parte por millón de la longitud del vector.

Las coordenadas definitivas de SIRGAS 95 están referidas a ITRF 94 época 1995.4.

En mayo de 2000 se realizó una nueva medición de SIRGAS.

En febrero de 2001 se llevaron a cabo en Cartagena - Colombia reuniones del Grupo SIRGAS y se produjeron novedades en cuanto al nombre de SIRGAS. Anteriormente significaba Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur y a partir de dicha reunión se denomina Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, aceptándose la incorporación de los países de América Central y de América del Norte. Se incorporaron las estaciones que se midieron en América Central y Norte durante el tiempo de medición de SIRGAS 2000, pasando a estar integrado en la actualidad por un total de 180 puntos en toda América. El procesamiento de la Red SIRGAS 2000 se realizó en dos centros de cómputos en forma simultánea (el DGFJ de Alemania y el IBGE de Brasil) con el software científico Bernese.

EL MARCO DE REFERENCIA POSGAR 98

De acuerdo a especificaciones del proyecto SIRGAS se realizó un recálculo de la Red POSGAR 94, surgiendo así el Marco de Referencia POSGAR 98.

El Marco de Referencia POSGAR 98 materializa a ITRS en Argentina (a diferencia de POSGAR 94 que materializa a WGS 84). POSGAR 98 se encuentra apoyado en ITRF 94 época 1995.4 (al igual que SIRGAS 1995). Para las transformaciones de época se utilizó el modelo geofísico NNR NUVEL1. El procesamiento se realizó con el software científico Bernese V4.0.

COMPARACIONES ENTRE LOS MARCOS DE REFERENCIA CAMPO INCHAUSPE 1969, POSGAR 94 Y POSGAR 98

De los 127 puntos que componen la Red POSGAR 94, 56 son comunes con el Marco de Referencia Campo Inchauspe 1969. A su vez, 10 de los 50 puntos SIRGAS pertenecen a la Argentina, de los cuales 6 son coincidentes con POSGAR 94 y los 10 con POSGAR 98. Esto permitió la comparación de las Redes Campo Inchauspe 1969 y POSGAR con ITRF de orden de precisión superior.

La precisión del Marco de Referencia Campo Inchauspe 1969 es del orden de 3 a 10 ppm de la longitud de sus lados y la de POSGAR 94 de 1 ppm. POSGAR 98 es más preciso que POSGAR 94 en factores que llegan a algo más que cuatro en latitud y longitud y hasta diez en altura elipsoidal.

Al pasar de POSGAR 94 a POSGAR 98 los cambios son en latitud y longitud inferiores a 0,80 m y en altura inferiores a 1,5 m. La comparación de las coordenadas relativas de estos dos marcos de referencia, permitieron determinar que las distorsiones de POSGAR 94 en latitud y longitud son prácticamente despreciables en áreas menores que una provincia. Las distorsiones en altura de POSGAR 94 son notables en todas las comparaciones realizadas, por lo cual si se desea trabajar con alta precisión en las tres coordenadas, sería ventajoso usar POSGAR 98. En definitiva, si se trabaja en áreas menores que el área de una provincia y no se tienen exigencias de precisión sobre las alturas elipsoidales, no habrá mayor diferencia entre usar uno u otro marco de referencia como control en cuanto a las deformaciones que los puntos de control producen en la red al someterla a un ajuste.

El grupo de trabajo Sistemas Geodésicos, perteneciente al Comité Nacional de Geodesia de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (UGGI), fue creado específicamente para asesorar al Instituto Geográfico Militar de Argentina, como responsable del mantenimiento del Marco de Referencia Geodésico Nacional, sobre el mantenimiento del marco actual que es POSGAR 94 o cambiarlo por su recálculo que es POSGAR 98. El grupo se expidió sobre el tema y la resolución final es la de continuar trabajando en POSGAR 94, si bien reconoce todas las ventajas científicas que ofrece POSGAR 98.

LA INTEGRACIÓN DE LAS REDES GPS

Provincias como Buenos Aires, Santa Fé, Mendoza, Neuquén, Río Negro, Chubut y Tierra del Fuego, han densificado la red POSGAR. Son las denominadas REDES PROVINCIALES. Otras provincias cuentan con las redes de los Proyectos PASMA I y PASMA II (PASMA son las siglas de Programa de Asistencia al Sector Minero Argentino) y con Proyectos Catastrales, todos ellos vinculados también a POSGAR. Por otro lado, existe la Red RAMSAC del Instituto Geográfico Militar (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo), consistente en Estaciones GPS que operan todos los días del año (permanentes) y que permiten a usuarios de receptores de simple frecuencia disponer de una cobertura GPS en un radio de 200 a 300 km con una precisión en el posicionamiento por debajo de los 50 cm.

El conjunto de las Redes POSGAR, RAMSAC, PASMA y PROVINCIALES suman en la actualidad aproximadamente 2000 puntos, todos ellos con coordenadas GPS.

La Disposición 16/02 del Instituto Geográfico Militar de julio de 2002, permitirá integrar dentro del Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR 94, adoptado por la Disposición 13/97, toda la información geodésica disponible.

Se dispondrá en el futuro, de una Red GPS de primer orden (POSGAR) y de una Subred GPS producto de la integración del resto de las redes citadas. El conjunto de las dos redes permitirá disponer de una cobertura aproximada de 20 km para cada estación.

UN MARCO DE REFERENCIA ACTIVO NACIONAL

De acuerdo a lo ya visto, los Marcos de Referencia Mundiales son activos, es decir que las coordenadas de sus puntos varían con el transcurrir del tiempo debido al movimiento de placas. La tecnología satelitaria permite verificar mediante mediciones periódicas tales desplazamientos. Es probable que en el futuro se adopte un marco de referencia activo, en el cual aparecerá la cuarta coordenada del punto que es su velocidad de desplazamiento.

Existe una idea generalizada de separar la parte legal de la científica. Para todo lo que signifique mediciones donde intervenga la parte legal, es probable que se utilice un marco de referencia fijo y se tendrá en cuenta el marco de referencia móvil o activo para mediciones de carácter científico.

¿ES NECESARIO EDITAR NUEVAMENTE LA CARTOGRAFÍA AL CAMBIAR EL SISTEMA DE REFERENCIA?

La mayor parte de la cartografía del Instituto Geográfico Militar de Argentina se encuentra georreferenciada en el Sistema de Referencia Campo Inchauspe 1969. El cambio de Sistema de Referencia implica un corrimiento de los vértices del trapecio que limita la hoja cartográfica, que en el caso específico de la transformación Campo Inchauspe 1969 a POSGAR se encuentra en el orden de los 100 m, representado por 4 mm en cartografía a escala 1:25.000 (la mayor escala cartográfica del IGM). Entonces no se justifica editar nuevamente la cartografía al cambiar el Sistema de Referencia. Basta con indicar el nuevo marco de referencia en la hoja, a través de marcas que indiquen la nueva posición de los vértices del trapecio acompañado de una nota marginal indicativa.

ALTIMETRIA

ALTURAS ORTOMÉTRICAS, GEOMÉTRICAS Y ELIPSOIDALES

La **altura ortométrica** de un punto del terreno es la distancia medida a lo largo de la vertical (levemente curva) entre dicho punto y el geoide. La definición de GEOIDE considerada dentro de los grupos especializados de la Asociación Internacional de Geodesia es la siguiente: *Superficie de nivel del campo de gravedad terrestre, ajustada al nivel medio del mar determinado por series de 18,67 años de observación y corregidas por los mejores modelos de circulación, de influencia meteorológica y de tectónica de placas.*

Se denominan **alturas geométricas** a las obtenidas por el método topográfico-geodésico de nivelación geométrica.

Las alturas así halladas no tienen en cuenta la desviación de la vertical, como consecuencia de la falta de paralelismo de las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre.

Las alturas ortométricas sí tienen en cuenta la desviación de la vertical. Para hallar la altura ortométrica de un punto del terreno a partir de la altura geométrica medida, será necesario conocer el valor de gravedad del mismo por medio del uso de gravímetros.

La diferencia entre las alturas geométrica y ortométrica (corrección ortométrica) se estima que puede variar desde unos pocos milímetros a algunos decímetros, y su valor depende no solo de la pendiente del terreno, sino del material que se encuentre bajo la superficie terrestre.

La **altura elipsoidal** de un punto del terreno es la distancia medida a lo largo de la normal al elipsoide entre dicho punto y el elipsoide de referencia.

EL NIVEL MEDIO DEL MAR

El nivel medio del mar nos permite aproximarnos al geoide. Los efectos oceanográficos producen diferencias en su determinación, que en el peor de los casos pueden exceder al metro pero que generalmente son menores.

El nivel medio del mar se define como la media aritmética de alturas horarias de marea (o alturas equiespaciadas con un intervalo menor) durante un período de tiempo adecuado que permite eliminar el aporte de la marea, fenómeno resultante de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúan sobre la Tierra. Por lo tanto, se deben realizar largas series de mediciones de marea para poder determinar el nivel medio del mar con precisión.

Las primeras mediciones de marea se realizaban con reglas que se disponían sobre la playa y se vinculaban altimétricamente, mediante una nivelación geométrica, a puntos fijos en tierra. Con la aparición de los primeros mareógrafos a flotador se pudo disponer de mediciones continuas y prolongadas en el tiempo, donde la precisión alcanzada es de $+/- 1$ cm en altura y $+/- 1$ minuto en tiempo. También se puede medir el nivel del mar por medio de satélites altimétricos como el GEOSAT y el TOPEX/POSEIDON.

En el año 1996, el Instituto Geográfico Militar vinculó los mareógrafos de Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado con puntos altimétricos en tierra con cotas referidas al Cero IGM (cero del mareógrafo de Mar del Plata), utilizándose un registro de corta longitud. Con posterioridad se vincularon los mareógrafos de Río Gallegos y Ushuaia.

Como se disponía de los registros de los mareógrafos de flotador de los puertos de Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado, se realizó la determinación de la variación de la cota del nivel medio del mar en dichos puntos, referida al Cero IGM. No se dispuso de series completas para todas las estaciones mareográficas. Los niveles medios de 19 años para el período 1958-1976 variaron pocos centímetros en cuatro de las cinco estaciones mareográficas, salvo para Puerto Madryn con algo más de dos decenas de centímetros.

LOS PRIMEROS TRABAJOS DE NIVELACIÓN

Los primeros trabajos de nivelación tuvieron como objetivo establecer una base para los estudios hidrográficos de los grandes ríos mesopotámicos. Dichos trabajos datan del año 1899 y el encargado de realizarlos era el Ministerio de Obras Públicas (Dirección General de Obras Hidráulicas).

Hacia 1909, existían unos 3.800 km de línea nivelada con cerca de 430 referencias, distribuidas en las provincias de Buenos Aires, Santa Fé, Entre Ríos y Corrientes. Estas líneas se desarrollaron a lo largo de los principales ferrocarriles.

También en Santa Fé se llevaron a cabo los primeros trabajos de nivelación de precisión por parte del Instituto Geográfico Militar. A tales efectos se dividió a la provincia en 12 polígonos de unos 300 a 400 km de perímetro cada uno, cuyos lados se los hizo coincidir generalmente con las vías férreas.

EL PUNTO ALTIMÉTRICO DE REFERENCIA NORMAL

En el año 1923 se determina el nivel medio del mar por el mareógrafo del Puerto de Mar del Plata. A partir del citado año, toda la altimetría de la cartografía del IGM se refiere a dicho cero (Cero IGM).

Antes de la determinación del Cero IGM, los trabajos de nivelación se encontraban referidos al Cero del Mareógrafo del Riachuelo, que se encuentra 0,255 m más alto que el Cero IGM.

El punto de arranque de las líneas de nivelación nacionales se denomina PARN (Punto Altimétrico de Referencia Normal). Se encuentra ubicado en el Parque de la Independencia de la ciudad de Tandil, sobre un manto cristalino situado entre 6 y 10 m de profundidad que garantiza la estabilidad del punto. Con el objeto de relacionar el P.A.R.N. con el Cero IGM, se construyó una línea de Alta Precisión compuesta de 75 puntos distantes entre sí aproximadamente de 2 a 3 km. La línea se construyó en dos partes, la primera entre los años 1947 y 1948 y la segunda en el año 1950. Esta línea termina en un punto ubicado en la Plaza Luro de la ciudad de Mar del Plata.

CONSTITUCIÓN DE LA RED DE NIVELACIÓN DE ALTA PRECISIÓN

La Red de Nivelación de Alta Precisión divide al territorio de la República Argentina en polígonos cerrados y en polígonos periféricos sobre el litoral marítimo. Las líneas de nivelación de alta precisión arrancan y cierran en puntos altimétricos de 1ra. Categoría denominados Nodales, ubicados generalmente en las plazas de los pueblos o ciudades. La Red de nivelación de alta precisión está constituida por puntos altimétricos de segunda categoría y se desarrolla a la largo de caminos nacionales y provinciales, lo que explica el trazado irregular de los polígonos.

Los puntos altimétricos se encuentran materializados por un pilar de hormigón y ubicados a no más de 30 m del alambrado en el interior del campo. Si no hay alambrado, se ubican a partir del eje del camino, a unos 50 m del mismo.

Podemos distinguir dos períodos en la medición de la Red de Nivelación de Alta Precisión, antes y después de la promulgación de la Ley de la Carta, de fecha 3 de octubre de 1941. Con anterioridad a la promulgación de la citada Ley, se habían medido Líneas de Nivelación de Alta Precisión en las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fé y Córdoba. En la etapa posterior a la Ley de la Carta, se comenzó nuevamente la construcción y medición de la Red de Nivelación de Alta Precisión, con vinculaciones a puntos de la Red anterior. Algunas líneas de la anterior Red integran la nueva. Las dos nivelaciones se encuentran referidas al Cero IGM.

El total de puntos altimétricos monumentados con valor de cota conocido es de más de 32.000, de los cuales aproximadamente el 50% pertenece a puntos de la Red de Nivelación de Alta Precisión. El resto de los puntos se divide en aproximadamente 24% para puntos de líneas de precisión (con arranque y cierre en puntos de líneas de alta precisión) y el 26% restante para puntos de líneas topográficas (con arranque y cierre en puntos de líneas de precisión).

Desde 1969 a 1971 se realizó en EEUU la compensación de 54.000 km correspondientes a líneas de nivelación de alta precisión. De 1971 a 1997, el IGM compensó provisoriamente 32.000 km más con un programa en lenguaje fortran. Actualmente se realiza un ajuste provisorio con el mismo programa al terminarse de medir 4 ó 5 polígonos de nivelación de Alta Precisión contiguos.

ONDULACIÓN DEL GEOIDE

Una vez determinada la corrección ortométrica, se aplica a la altura geométrica obteniéndose la altura ortométrica que representa la verdadera altura del punto del terreno respecto del geoide, medida a lo largo de la línea de la plomada desde el terreno al geoide (ligeramente curvada). La simbolizamos con H.

Si disponemos del valor de la altura elipsoidal de dicho punto respecto del elipsoide de referencia (h), podremos conocer la ubicación del geoide respecto del elipsoide, valor que se denomina Ondulación del Geoide y se simboliza con la letra N, por diferencia de alturas. Es decir que: $N = H - h$.

Existen modelos de geoide que nos permiten obtener N con solo conocer las coordenadas latitud y longitud del punto.

Estos modelos fueron obtenidos por interpolación a partir de puntos del terreno con N conocida. Entre los modelos conocidos podemos citar el OSU 91 y el EGM 96. La precisión de un modelo de geoide depende de la cantidad de puntos con N conocida, por ello surge la recomendación de realizar medición GPS diferencial en puntos de altura geométrica conocida. Si el valor de N es preciso, podremos obtener altura geométrica (H) precisa a partir de altura elipsoidal (h) medida con precisión. Es decir $H = N + h$.

EL ESTUDIO DEL ESCURRIMIENTO DE LAS AGUAS

Disponiendo de cartografía de una zona, sabemos que es posible realizar el estudio del escurrimiento de las aguas a partir de las curvas de nivel, integradas por puntos de igual altura respecto del geoide. Esto es posible pues el geoide acompaña al terreno en sus elevaciones y depresiones (si el terreno se eleva o deprime, el geoide se eleva o deprime suavemente acompañándolo). No ocurre lo mismo si disponemos de información altimétrica

satelital, pues sabemos que las alturas obtenidas por este método se encuentran referidas al elipsoide de referencia y el mismo no acompaña al terreno en sus elevaciones y depresiones.

LA COTA GEOPOTENCIAL

Si medimos gravedad en dos puntos del terreno de cota conocida, el producto de la gravedad promedio por el desnivel entre ambos puntos nos dará por resultado la diferencia de cota geopotencial entre ambos y el valor hallado representa el trabajo que debe realizar el vector gravedad para pasar de un punto al otro.

EL SISTEMA VERTICAL DE REFERENCIA

En el marco del proyecto SIRGAS se estableció un grupo de trabajo (Grupo III, Sistema Vertical de Referencia) cuya misión es establecer las bases conceptuales y metodológicas para la adopción de un sistema vertical común para todo el continente americano. En ese sentido, el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional creó el Grupo de Trabajo Origen Geopotencial, cuya misión es la determinación del origen geopotencial o cero de la red altimétrica nacional, para lo cual el citado grupo lleva a cabo tareas de revisión, corrección y homogeneización de la información altimétrica y gravimétrica disponible en el Instituto Geográfico Militar, para proceder luego al cálculo de las cotas geopotenciales.

BIBLIOGRAFÍA

- 100 Años del Quehacer Cartográfico del País. Instituto Geográfico Militar.
- Libro del XXV Aniversario de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas.
- Contribuciones a la Geodesia en la Argentina de Fines del Siglo XX - Homenaje a Oscar Parachú. Editorial UNR.
- Boletín N° 2/2000 de la Asociación Centro Argentino de Cartografía.
- Revista Cartográfica Nro 53/54 del Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina mediante observaciones GPS. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP.
- Boletín N° 11 del CSTG - Nuevas Misiones por Satélites para estudios de la Tierra Sólida.
- Geodinámica Global. Publicación de la NASA.

Rubén Carlos RAMOS

Agrimensor egresado de la Universidad de Buenos Aires.

Profesor del Curso Geotopocartográfico Preantártico dictado al Comando Antártico.

Profesor titular de Geodesia I (Astronómica y Geométrica) y Geodesia II (Gravimétrica y Satelital), dictado en el Servicio Geográfico del Instituto Geográfico Militar.

Profesor titular de Astronomía dictado en el Instituto de Profesorado del CONSUDEC

Ayudante de Trabajos Prácticos de la materia Topografía y Geodesia - Dep. Construcciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional (Regional Avellaneda).

Profesor en la Escuela Superior Técnica del Ejército y del Centro de Capacitación en Ciencias Geográficas del Instituto Geográfico Militar (CCCG).

