

**Comité Nacional de la Unión Geodésica  
y Geofísica Internacional**



Sistemas Geodésicos  
**Sistemas Geodésicos**



1999

**Comité Nacional de la Unión Geodésica  
y Geofísica Internacional**

Subcomité de Geodesia

Grupo de Trabajo Sistemas Geodésicos

# Sistemas Geodésicos

1ª. Edición 1999

## TABLA DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Introducción</b>   | 1  |
| <b>Capítulo 1</b>   |    |
| <b>LOS SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERENCIA</b>                                  |    |
| 1.1 Introducción  | 3  |
| 1.2 Sistemas locales  | 3  |
| 1.3 Sistemas geocéntricos   | 4  |
| 1.4 Sistemas de referencia y marcos de referencia                             | 4  |
| 1.5 Bibliografía del capítulo 1   | 5  |
| <b>Capítulo 2</b>   |    |
| <b>EL SISTEMA CAMPO INCHAUSPE</b>   |    |
| 2.1 Breve historia  | 6  |
| 2.2 Compensación y precisiones  | 6  |
| 2.3 Ejecución   | 7  |
| 2.4 Datum Sudamericano 1969   | 8  |
| 2.5 Recomendaciones para la utilización de Inchauspe 1969                     | 8  |
| 2.6 Los otros sistemas nacionales   | 8  |
| 2.7 Bibliografía del capítulo 2   | 9  |
| <b>Capítulo 3</b>   |    |
| <b>EL SISTEMA WGS 84</b>  |    |
| 3.1 Introducción  | 11 |
| 3.2 Definición  | 11 |
| 3.3 Relación de WGS 84 con sistemas inerciales y con sistemas instantáneos    | 12 |
| 3.4 Relación de WGS 84 con otros sistemas geocéntricos y con sistemas locales | 12 |
| 3.5 Actualización del sistema   | 12 |
| 3.6 Bibliografía del capítulo 3   | 13 |
| <b>Capítulo 4</b>   |    |
| <b>EL SISTEMA TERRESTRE INTERNACIONAL</b>                                     |    |
| 4.1 Introducción  | 14 |
| 4.2 Los productos del IERS  | 14 |
| 4.3 El sistema ITRF, un nuevo concepto de materialización                     | 16 |
| 4.4 Discusión del nuevo concepto, un ejemplo                                  | 16 |
| 4.5 Bibliografía del capítulo 5   | 17 |
| <b>Capítulo 5</b>   |    |
| <b>LA IMPORTANCIA DE LA GEORREFERENCIACIÓN</b>                                |    |
| 5.1 Introducción  | 18 |
| 5.2 El sistema de referencia único en la Argentina                            | 19 |
| <b>Capítulo 6</b>   |    |
| <b>EL SISTEMA POSGAR</b>  |    |
| 6.1 Introducción  | 20 |
| 6.2 El sistema POSGAR 94  | 21 |
| 6.3 El futuro del sistema POSGAR  | 22 |
| 6.4 Conclusiones  | 24 |

## Capítulo 7

### TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 7.1 | Introducción                                  | 25 |
| 7.2 | Transformación de coordenadas                 | 25 |
| 7.3 | Determinación de parámetros de transformación | 27 |
| 7.4 | La transformación Inchauspe 69 --> POSGAR 94  | 29 |

## Capítulo 8

### EL PROBLEMA ALTIMÉTRICO

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 8.1 | Introducción  | 30 |
| 8.2 | La altura elipsoidal $h$                                | 30 |
| 8.3 | La cota $H$ sobre el nivel medio del mar (geoide)       | 30 |
| 8.4 | Los modelos de geoide                                   | 31 |
| 8.5 | Metodología GPS para el análisis de un modelo de geoide | 32 |
| 8.6 | Cotas Geopotenciales                                    | 32 |
| 8.7 | Resumen de definiciones                                 | 32 |
| 8.8 | Bibliografía del capítulo 8                             | 33 |

## Capítulo 9

### LOS SISTEMAS DE PROYECCIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 9.1 | Proyecciones conformes                  | 34 |
| 9.2 | Gauss-Krüger                            | 34 |
| 9.3 | Coordenadas múltiples                   | 35 |
| 9.4 | Continuidades y discontinuidades        | 35 |
| 9.5 | U.T.M.                                  | 35 |
| 9.6 | Otras proyecciones                      | 36 |
| 9.7 | Cartografía regional y de áreas urbanas | 36 |
| 9.8 | Bibliografía del capítulo 9             | 37 |

## Capítulo 10

### LA TRANSICIÓN HACIA LOS NUEVOS SISTEMAS

|      |                                       |    |
|------|---------------------------------------|----|
| 10.1 | La situación                          | 40 |
| 10.2 | Posibles inconvenientes y su solución | 41 |
| 10.3 | Algunos casos probables               | 42 |

## Anexo

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>GRUPO DE TRABAJO III – SIRGAS</b> | <b>43</b> |
|--------------------------------------|-----------|

## Introducción

---

Con la experiencia favorable alcanzada en la edición de los Estándares Geodésicos, el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional creó el Grupo de Trabajo Sistemas Geodésicos con el propósito principal de contribuir al perfeccionamiento y difusión del sistema POSGAR.

Los objetivos del grupo, fijados por el Subcomité, fueron:

- contribuir al perfeccionamiento del sistema POSGAR 94 teniendo en cuenta los trabajos fundamentales SIRGAS, ITRF, CAP y otros,
- promover la aplicación de los ESTÁNDARES GEODÉSICOS, previendo su actualización,
- lograr el consenso en la planificación, el uso, la disponibilidad y la densificación de las redes geodésicas, tratando de unificar los criterios de aplicación,
- interrelacionar su actividad con los grupos dedicados al modelado del geoide para fortalecer y concretar la referencia altimétrica,
- establecer vinculaciones con los responsables de las estaciones permanentes GPS, y
- establecer intercambios con los grupos internacionales dedicados a los sistemas de referencia.

Con el fin de aunar los criterios de tratamiento de los temas involucrados y proponer soluciones técnicamente apropiadas y prácticamente ejecutables.

Para constituir el grupo fueron invitados a participar el doctor Claudio Brunini (Observatorio Astronómico de La Plata), el coronel Fernando Galbán (Instituto Geográfico Militar), el ingeniero Víctor Haar (Universidad Nacional de Córdoba), el ingeniero Héctor Herrero (Universidad Nacional de Tucumán), el ingeniero Ezequiel Pallejá (Universidad de Buenos Aires), el licenciado Raúl Perdomo (Observatorio Astronómico de La Plata), el agrimensor Rubén Rodríguez (Geomática Argentina S.A.) – a quien se lo designó coordinador de las actividades – y el ingeniero Ricardo Soto (Servicio de Hidrografía Naval).

Como se aprecia, la integración del conjunto proviene de los tres ámbitos interesados en el tema: el Estado, la universidad y la empresa. Sin embargo no se trató de un grupo cerrado sino que han participado, con distinto grado de presencia, miembros de la Escuela Superior Técnica, la Secretaría de Minería, el Consejo Federal del Catastro, la Comisión Nacional de Límites Internacionales, así como otros expertos del Instituto Geográfico Militar y del Observatorio Astronómico de La Plata.

A partir de su creación el grupo llevó a cabo sus actividades a través de reuniones plenarios y parciales de sus integrantes para definir la metodología a emplear y el contenido del documento. También revisó las vinculaciones entre el proyecto SIRGAS y la red POSGAR colaborando en la gestión de los trabajos pendientes y efectuó la presentación de su misión y de los avances realizados en reuniones técnicas y científicas y ante otros grupos interesados en el tema.

Respecto de la red POSGAR en particular, el grupo impulsó su utilización en diversos ámbitos a través de la enunciación de las ventajas de la aplicación de la misma como marco de referencia que, por sus características, adquiere alcance universal. El Instituto Geográfico Militar, por su parte, compartió el concepto y oficializó la red mediante la resolución 13/97.

Una vez fijado el contenido se dedicó a la redacción, en forma individual, de los diferentes capítulos para su consideración y aprobación en sesiones plenarios.

La redacción de los citados capítulos, que forman el texto, se distribuyó de la siguiente manera.

- 1 Los sistemas geodésicos de referencia, Ezequiel Pallejá.
- 2 El sistema Campo Inchauspe, Rubén Rodríguez.
- 3 El sistema WGS 84, Ezequiel Pallejá.
- 4 El sistema terrestre internacional, Raúl Perdomo y Fernando Galbán.
- 5 La importancia de la georreferenciación, Claudio Brunini.
- 6 El sistema POSGAR, Claudio Brunini.
- 7 Transformaciones entre sistemas, Claudio Brunini.
- 8 El problema altimétrico, Raúl Perdomo y Ricardo Soto.
- 9 Los sistemas de proyección para la cartografía, Rubén Rodríguez.
- 10 La transición hacia los nuevos sistemas, Rubén Rodríguez.

Esta situación muestra algunas diferencias de estilo en las distintas partes del documento. Es oportuno señalar, asimismo, que el documento no constituye una obra de texto, sino una exposición de la situación actual y un conjunto de sugerencias para el tratamiento de los sistemas geodésicos.

## Capítulo 1

# LOS SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERENCIA

---

### 1.1 Introducción

Los trabajos geodésicos, que implican la ubicación o posicionamiento de puntos dentro de nuestro planeta, requieren siempre una clara definición sobre el sistema en el cual se proporcionarán las coordenadas de los puntos.

### 1.2 Sistemas locales

La geodesia clásica ha resuelto este problema definiendo “sistemas geodésicos locales”, denominación que expresa claramente que su ámbito de aplicación es reducido, no universal.

Un sistema geodésico local queda definido por la elección de un elipsoide de referencia y por un punto origen (datum) donde se establece su ubicación en relación con la forma física de la tierra (geoide).

Concretamente, el punto datum es aquél en el que se hace coincidir la vertical del lugar con la normal al elipsoide (desviación de la vertical nula) y generalmente se establece la condición de tangencia entre el elipsoide y el geoide.

El elipsoide así elegido y posicionado, se adapta bien al geoide en las inmediaciones del punto datum (siempre que la elección haya sido criteriosa), pero a medida que nos alejamos crece la probabilidad de que esta adaptación aminore. Por esta razón los sistemas así definidos fueron utilizados por países o grupos de países permitiendo llevar adelante todos los proyectos geodésicos en sus respectivos territorios.

Los parámetros que definen un sistema geodésico local son:

- dos de ellos son necesarios para especificar el elipsoide, usualmente el semieje mayor **a** y el achatamiento o aplastamiento **f = (a-b)/a**,
- otros dos sirven para ubicar el punto datum. Son sus coordenadas latitud y longitud,
- finalmente, se requiere un acimut de origen en el punto datum a fin de orientar al elipsoide.

Los sistemas geodésicos locales se materializan mediante las redes de triangulación de diversos órdenes, cuyos vértices se denominan puntos trigonométricos.

Estas triangulaciones se ejecutan en varias etapas:

- proyecto de las redes.
- reconocimiento de vértices
- materialización (monumentación) de los mismos
- preparación de mediciones (erección de torres, centración, etc.)
- ejecución de mediciones angulares, de distancias, y astronómicas
- cálculo provisorio de coordenadas
- compensación y asignación de coordenadas definitivas a cada vértice.

El proceso total involucraba la ejecución de numerosas determinaciones astronómicas fundamentales, que sirven para plantear ecuaciones de orientación. Estas estaciones astronómicas se denominan “puntos Laplace”, y las ecuaciones que a partir de ellos se plantean se denominan ecuaciones Laplace.

Entre los problemas que los sistemas geodésicos locales dejan sin resolver podemos destacar dos:

- al encontrarse dos o más redes basadas en diferentes sistemas (ej. en zonas limítrofes) resultan diferencias de coordenadas inaceptables,
- los sistemas locales son únicamente planimétricos, las cotas altimétricas se desarrollan a partir de otros caminos. en otras palabras, no son sistemas tridimensionales.

### 1.3 Sistemas geocéntricos

Se define como un sistema geocéntrico aquél que especifica una terna de ejes ortogonales cartesianos X, Y, Z centrado en el centro de masas de la tierra. Estos sistemas terrestres (fijados a la Tierra) tienen el eje X solidario al meridiano origen de las longitudes y el eje Z próximo al eje de rotación, por lo tanto este sistema “gira” juntamente con la tierra. Estos sistemas resultan imprescindibles para ubicar puntos ligados al planeta Tierra.

A diferencia de los sistemas geodésicos locales, los sistemas geocéntricos son tridimensionales y de alcance global. El concepto de punto datum desaparece, y es reemplazado por el origen y orientación de la terna de referencia.

Ejemplos de sistemas geocéntricos terrestres son el WGS84 y el ITRF, que se desarrollarán en otras secciones de este trabajo.

### 1.4 Sistemas de referencia y marcos de referencia

Existe alguna confusión en los conceptos de sistemas y marcos de referencia. Los sistemas de referencia son los estudiados en la sección anterior: se definen a partir de consideraciones matemáticas y físicas e involucran la especificación de parámetros, puntos origen, planos, ejes, etc.

Los marcos de referencia están constituidos por puntos materializados en el terreno y ubicados con gran exactitud y precisión según alguno de los sistemas de referencia.

En los sistemas geodésicos locales, el marco de referencia estaba dado por los puntos trigonométricos de distintos órdenes que a través de cadenas y mallas cubren los territorios.

En los sistemas geocéntricos, se llevan adelante redes de puntos medidos usualmente con GPS y vinculados en lo posible a puntos de las redes anteriores, siguiendo una serie de precauciones para minimizar los errores sistemáticos y aleatorios que pueden afectar al conjunto. Un ejemplo de marco de referencia es el **POSGAR 94** que se analiza en otra sección.

En la época en que se escriben estas líneas, en el mundo entero se está produciendo una transición de los sistemas locales a los sistemas geocéntricos. En nuestro país, ello implica el paso del sistema **Campo Inchauspe** al marco de referencia **POSGAR** y sistemas **WGS 84** e **ITRF**.

## **1.5 Bibliografía del capítulo 1**

Bomford G. Geodesy. Clarendon Press, Oxford, 1980

Caputo M. The Gravity Field Of The Earth. Academic Press New York

Defense Mapping Agency. World Geodetic System 1984, Technical Report. December 1987.

Mueller I. Gravimetric And Celestial Geodesy, A Glossary of Terms. Frederick Ungar Publishing Co.

## Capítulo 2

### EL SISTEMA CAMPO INCHAUSPE

---

#### 2.1 Breve historia

El sistema Campo Inchauspe tiene su origen en el punto astronómico fundamental del mismo nombre ubicado en las proximidades de la intersección del meridiano -62 con el paralelo -36 cerca de la ciudad de Pehuajó, en la provincia de Buenos Aires.

El sitio fue elegido en base a los análisis de la desviación posible de la vertical estudiada por el doctor Guillermo Schulz y el ing. Guillermo Riggi O'Dwyer y se le asignó la característica dominante en la época para un punto datum: coordenadas elipsóidicas, latitud, longitud y acimut, iguales a las astronómicas y tangencia entre el elipsoide y el geoide, es decir ondulación igual a cero. La decisión oficial se materializó mediante la Disposición Permanente Nro. 440 (30 noviembre 1946) del Instituto Geográfico Militar.

El elipsoide asociado fue el Internacional de 1924 ( $a = 6378388$   $1/f = 297$ ) que ya había sido adoptado por la Argentina junto con la proyección Gauss-Krüger mediante la Disposición Permanente Nro. 197 (24 abril 1925) del Instituto Geográfico Militar.

Alrededor de dicho punto se iniciaron los trabajos de la triangulación fundamental que en 1954 alcanzó a cubrir un área de 10 polígonos los que fueron compensados por métodos manuales en el mismo año y que constituyó la primera red de envergadura ejecutada en el país. Las coordenadas resultantes se conocieron como Campo Inchauspe 1954.

#### 2.2 Compensación y precisiones

Quince años después, los polígonos cerrados eran 19 y se realizó entonces un recálculo de la estación astronómica Campo Inchauspe para reducirla al Origen Convencional Internacional (O.C.I.) recomendado por la U.G.G.I. en 1967 y el ajuste de la red (1000 puntos con 5000 observaciones: ángulos, distancias y acimutes) mediante el método de variación de coordenadas geográficas. La obra constituyó una etapa trascendente para la geodesia argentina y es necesario significar el aporte de Esteban Horvat, Alfredo Elías y Alberto Christensen con el apoyo de Luis María Martínez Vivot y David Byars.

El error medio de la unidad de peso del ajuste fue  $0.42''$  y a la compensación de la red fundamental siguieron las compensaciones de las redes de densificación de primero y segundo orden medidas para la época. Esta red y sus coordenadas recibieron el nombre de Campo Inchauspe 1969.

A continuación, y a medida que se cerraban polígonos o se completaban las redes de densificación se realizaba su compensación. Dentro del marco rígido de cada orden superior se calcularon y ajustaron las redes de tercero y cuarto orden y también se redujeron al mismo sistema los trabajos previos existentes en el país.

La finalización de los trabajos de triangulación y poligonación fue marcada por la aparición de la geodesia satelitaria. Los puntos con coordenadas Campo Inchauspe 1969 sumaban 18000 y la cantidad de anillos de primer orden cerrados 44.

La precisión de la red puede considerarse comprendida entre 3 y 10 ppm en base a los resultados estadísticos de las compensaciones parciales. También puede analizarse a partir de su comparación con patrones externos. Al respecto existen dos principales: la red Doppler 1978 y la red POSGAR 94.

La comparación de una decena de vectores (cuerdas) entre la red Doppler y la red Inchauspe presentó una discrepancia media de 2.7 ppm.

Al hacer un análisis similar respecto de la red POSGAR, esta vez cotejando 30 líneas geodésicas, la disparidad fue de 3.3 ppm.

### **2.3 Ejecución**

La ubicación de los puntos Inchauspe 1969 responde a los criterios de elección de los sitios de la triangulación y poligonación: puntos dominantes, visuales despejadas, fuerza de las figuras, limitación de distancias. Estas condiciones localizaron los puntos dentro de los campos o en las cumbres de los cerros, con un acceso no siempre sencillo desde las rutas y caminos.

El desarrollo de la red fue realizado a través de cadenas de triángulos dobles superpuestos (cuadriláteros) con extensiones de unos 200 km formando un reticulado uniforme. En la intersección de las mismas se estableció un punto de Laplace y una base geodésica, medida con alambres de invar inicialmente y luego con distanciómetros electro-ópticos. En los últimos tramos de la red se empleó la combinación de la medida de ángulos y lados en todas las figuras. El contralor de los electrodistanciómetros se llevó a cabo en la Base de Contraste para Electrodistanciómetros establecida en Arrecifes en 1975.

Las técnicas de ejecución de las redes y las tolerancias de medición se las puede encontrar en las clásicas Instrucciones Técnicas para los Trabajos Geodésicos (I.T. 6a.) cuya primera edición data de 1946 y en las más modernas Instrucciones Técnicas para los Trabajos de Campo (ITTC), fascículo Triangulación y Poligonación, editadas en 1983.

La marcación típica de los puntos de primero, segundo y tercer orden fue un pilar de hormigón coronado con una chapa de bronce con la leyenda Ejército Argentino - Instituto Geográfico Militar y la sentencia "hasta cuatro años de prisión a quién destruya esta señal". Los puntos de cuarto orden son, en su mayoría, molinos de viento o torres de iglesias.

En cada punto de la red, para poder observar los circundantes se erigía la torre de triangulación de sección cuadrada con alturas que alcanzaron los 36 metros. En el caso de vértices ubicados en las cumbres de las montañas, bardas o lomas se instaló la llamada torre de montaña de aproximadamente 1.20 m de altura que permite estacionar el teodolito.

Para encontrar los puntos se cuenta con los croquis elaborados por los equipos de reconocimiento (las conocidas monografías).

A pesar de su ubicación algunos de los puntos fueron utilizados por las redes posteriores: Doppler, POSGAR y las redes provinciales.

Todos los vértices de la red Campo Inchauspe tienen un punto cercano para la orientación de los trabajos derivados: el pilar de acimut, que tiene la característica adicional de estar ubicado en un sitio fácilmente identificable en las fotografías aéreas. Los puntos desde los cuales son visibles otros puntos de la misma red no cuentan con el pilar de acimut y la monografía expresa cuál es la visual más favorable para el arranque.

Un detalle a tener presente en los datos del pilar de acimut es que el único valor geodésico válido es su acimut desde el punto principal, dado que la distancia es sólo aproximada por la forma que fue determinada.

## **2.4 Datum Sudamericano 1969**

Las observaciones de la red Inchauspe participaron del proyecto geodésico continental conocido como Datum Sudamericano de 1969 (SAD 69). El objetivo fue integrar todas las redes geodésicas de la América del Sur para el desarrollo de un datum unificado. El origen elegido fue Chua (ubicado en Brasil, Lat.  $-19^{\circ} 45'$  Long.  $-48^{\circ} 6'$ ).

El cálculo se llevó a cabo mediante dos arcos geodésicos, uno hacia el Sur partiendo de Chua a través de Brasil, Paraguay, Uruguay, la Argentina, Chile y Bolivia y otro hacia el Norte por Brasil, Guyana, Venezuela, Colombia y Ecuador. En el arco Sur, del que participaron unas 800 estaciones, el error medio cuadrático de una dirección fue de  $0.67''$ .

El proyecto incluyó una carta geoidal de América del Sur y otras referidas a los datums locales (por ejemplo Campo Inchauspe 1969).

La tarea fue coordinada por un Grupo de Trabajo del Comité de Geodesia del I.P.G.H. y el mayor aporte científico estuvo a cargo de la doctora Irene Fischer del entonces Comando Topográfico de la Agencia Cartográfica de Defensa de los Estados Unidos de América.

## **2.5 Recomendaciones para la utilización de Inchauspe 1969**

Es conveniente usar preferentemente (en el futuro será inevitable) como puntos de vínculo y orden superior los pertenecientes a la red POSGAR, o los derivados de esta red, utilizando los parámetros elipsóidicos de WGS 84.

En el caso de utilizar puntos o valores en ambos sistemas, debe indicarse si fueron calculados independientemente o como producto de alguna transformación.

Las transformaciones entre POSGAR 94 e INCHAUSPE 69, están tratadas en el capítulo correspondiente de esta misma obra.

Las coordenadas Inchauspe 1969, transformadas a POSGAR 94, pueden utilizarse sólo como coordenadas iniciales para el cálculo de los vectores pero no son válidas como origen de una red en POSGAR 94.

## **2.6 Los otros sistemas nacionales**

Antes de definirse Campo Inchauspe como el sistema nacional existieron otras redes, generalmente localizadas en un área, y también después de la iniciación de los trabajos de la red Inchauspe se ejecutaron otras redes en áreas distantes del núcleo central.

Los sistemas antiguos establecidos por el Instituto Geográfico Militar reducidos a Campo Inchauspe 1969 se incluyen en la planilla anexa, donde se menciona su nombre, las provincias que cubren, la cantidad de puntos y el error medio cuadrático de la unidad de peso al calcularse sometido a Campo Inchauspe. En algunos casos están separados por su

orden y en otros constituyen un conjunto de cálculo, a veces agrupados por sectores, por lo que el error representa el promedio de estos.

En el caso del sistema Castelli que cubría las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Corrientes, Misiones, Córdoba, Mendoza y San Juan, sólo fue recuperada la red de la provincia de Buenos Aires al Este del meridiano  $-58^{\circ}$ . El sistema Huemules, ubicado en Chubut y Santa Cruz, no fue reducido a Inchauspe 1969.

Existen además sistemas ejecutados por distintas entidades nacionales que no fueron incorporados a la red oficial, y cuyos datos originales o reducidos a Inchauspe 69 deberían ser requeridos a los entes ejecutores. Mencionaremos entre ellos:

- las redes costeras desarrolladas por el Servicio de Hidrografía Naval,
- los sistemas fronterizos ejecutados por las comisiones mixtas limítrofes, con la participación de la Comisión Nacional de Límites Internacionales, y
- los sistemas Aguaray, Pampa del Castillo, Chos Malal y Quiñi-Huao extendidos por YPF.

Un caso particular es la red ejecutada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires que cubre una zona de la Provincia de Mendoza. Este sistema, que si bien no está reducido a Inchauspe 69, fue calculado - en 1978 - con los programas de compensación del Instituto Geográfico Militar. La red está integrada por 37 estaciones, un punto de fijo de origen (el extremo Norte de la base Uspallata), dos acimutes de Laplace y tres bases. El error medio cuadrático de la unidad de peso del ajuste fue de 0.7".

|    | Sistema                          | Provincia/s                    | Cantidad de puntos |         | E.M.C.   |
|----|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|
|    |                                  |                                | total              | comunes | seg.arco |
|    |                                  |                                |                    | CAI 69  |          |
| 1  | 25 de Mayo, I y II orden         | San Juan                       | 62                 | 24      | 1.4      |
| 2  | 25 de Mayo, III y IV orden       | San Juan                       | 74                 | 43      | 3.4      |
| 3  | Castelli                         | Buenos Aires                   | 53                 | 2       | 1        |
| 4  | Chos Malal                       | Nqn., Mza., R. Negro, L. Pampa | 700                | 35      | 4.3      |
| 5  | Cumbicha, I y II orden           | Catamarca                      | 27                 | 20      | 1        |
| 6  | Malezales Correntinos, I y II o. | Corrientes, Misiones           | 145                | 44      | 2        |
| 7  | Pampa del Castillo               | Chubut, Santa Cruz             | 95                 | 3       | 0.6      |
| 8  | Tapi-Aike, III y IV orden        | Santa Cruz                     | 258                | 30      | 2.7      |
| 9  | Ubajay                           | Entre Ríos, Corrientes         | 127                | 6       | 0.8      |
| 10 | Yavi, I orden                    | Jujuy                          | 24                 | 4       | 1.3      |
| 11 | Yavi, II orden                   | Jujuy                          | 18                 | 9       | 1.8      |

## 2.7 Bibliografía del capítulo 2

- Cerrato, Á. y R. Rodríguez. Proyecto y Medición de una Base Patrón para Contraste de Electodistanciómetros. I.P.G.H. Revista Cartográfica Nro. 34. México, 1978.
- Christensen, A. y A. Elías. Programación de la Compensación de las Redes del Instituto Geográfico Militar. Comité Nacional de la U.G.G.I. Buenos Aires, 1973.
- Fischer, I. The Basic Framework of the South American Datum of 1969. I.P.G.H. Revista Cartográfica Nro. 23. Buenos Aires, 1972.
- Instituto Geográfico Militar. 100 Años en el Quehacer Cartográfico del País. Buenos Aires, 1979.
- National Geodetic Survey. Geodetic Glossary. N.O.A.A. Rockville, 1986
- Negri, H. Reconocimiento Trigonométrico de I y II Orden. Construcción de Torres y Marcas Geodésicas. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Nacional de La Plata. La Plata, 1950.

- Rodríguez, R.. The Development of Geodesy and Cartography in Argentina. Surveying and Land Information Systems, Vol. 55, Nro.2, 1995.
- Rodríguez, R.. El Establecimiento de Estaciones Doppler en la Red Fundamental Argentina. I.P.G.H. Revista Cartográfica Nro. 31. México, 1977.
- Rodríguez, R. y H. Scampini. El Sistema Chos Malal reducido a Inchauspe 69. Revista del Instituto Geográfico Militar Nro. 3. Buenos Aires, 1987.
- Subcomité de Geodesia, Comité Nacional de la U.G.G.I. Estándares Geodésicos, Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Buenos Aires, 1996.
- Usandivaras, J. y C. Rodríguez. Sistemas de Referencia. Revista del Instituto Geográfico Militar Nro. 5. Buenos Aires, 1988.

*Una imagen de los instrumentos y equipos utilizados en la ejecución de la red Campo Inchauspe y de los sistemas anteriores, así como algunos documentos que muestran el desarrollo de las obras pueden observarse en el Museo Histórico del Instituto Geográfico Militar, en Cabildo 381 - Buenos Aires.*

## Capítulo 3

### EL SISTEMA WGS 84

---

#### 3.1 Introducción

El acrónimo **WGS 84** proviene de **World Geodetic System 1984** (Sistema geodésico mundial 1984). Se trata de un sistema de referencia creado por la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (Defense Mapping Agency - **DMA**) para sustentar la cartografía producida en dicha institución y las operaciones del Departamento de Defensa (**DoD**).

Este sistema geodésico estuvo estrechamente ligado al desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (**GPS**) sirviendo durante mucho tiempo para expresar las posiciones tanto de los puntos terrestres como de los satélites integrantes del segmento espacial (a través de las efemérides transmitidas).

Desde el punto de vista militar, WGS 84 es el sistema oficial aprobado por la Junta de Comandantes en Jefe de los Estados Unidos de América para las operaciones militares en todo el mundo. Casi todo el equipamiento militar actual incluyendo sistemas de navegación y armamentos emplean de algún modo este sistema de referencia mundial.

El **WGS 84** no es sólo un sistema geocéntrico fijado a la tierra (**ECEF**) de ejes **X, Y, Z** sino además un sistema de referencia para la forma de la tierra (elipsoide) y un modelo gravitacional.

El **WGS 84** se ha popularizado por el uso intensivo de **GPS** y se han determinado parámetros de transformación para convertir coordenadas a todos los sistemas geodésicos locales y otros sistemas geocéntricos (ver secciones respectivas).

La **DMA** llegó a la definición de este sistema después de haber ensayado otros tres anteriores: **WGS 60, WGS 66 y WGS 72**, este último a partir del sistema satelitario Transit (Transit Doppler Reference Frame - **NSWC 9Z - 2**) y muy parecido al actual **WGS 84**, al punto que para pasar de uno al otro sólo es necesario un corrimiento del origen de coordenadas de 4.5 metros, una rotación alrededor del eje **Z** de 0.814 segundos de arco y una diferencia de factor de escala de -0.6 ppm.

#### 3.2 Definición

El **WGS 84** es un Sistema Convencional Terrestre (**CTS**) tal que:

- 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 Internacional 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
- otros parámetros, además de los anteriores, son:
  - constante de gravitación terrestre **GM** =  $3986005 \times 10^8 \text{m}^3\text{s}^{-2}$
  - velocidad angular de la tierra **w** =  $7292115 \times 10^{-11}$  rad/seg
  - coeficiente gravitacional de segundo grado normalizado **C<sub>20</sub>** =  $-484.16685 \times 10^{-6}$
  - velocidad de la luz en el vacío **c** =  $299792458 \text{m s}^{-1}$

### 3.3 Relación de WGS 84 con sistemas inerciales y con sistemas instantáneos

La relación matemática entre los sistemas geocéntricos **WGS 84** (que es un **CTS**), **CIS** (sistema inercial anteriormente materializado por el Catálogo Fundamental de Estrellas **FK5** para la época J2000.0, actualmente el CIS se materializó con un conjunto de posiciones de radiofuentes lejanas observables con VLBI) e **ITS** (sistema instantáneo) es la siguiente:

$$\text{CTS} = \text{WGS 84} = [\mathbf{A}] [\mathbf{B}] [\mathbf{C}] [\mathbf{D}] \text{ CIS} \quad \text{siendo ITS} = [\mathbf{B}] [\mathbf{C}] [\mathbf{D}] \text{ CIS}$$

donde:

- [A]**= Matriz de rotación por movimiento de los polos
- [B]**= Matriz de rotación por movimiento de revolución de la Tierra (tiempo sideral)
- [C]**= Matriz de rotación por nutación
- [D]**= Matriz de rotación por precesión

### 3.4 Relación de WGS 84 con otros sistemas geocéntricos y con sistemas locales

Probablemente ningún sistema geodésico haya sido tan estudiado en relación con todos los demás como el WGS 84.

Un ejemplo de esto es la reciente determinación de los parámetros de transformación con el sistema PZ-90, utilizado por la constelación GLONASS que está siendo integrada actualmente al sistema GPS.

Existe un extenso *software* para transformar WGS 84 a cada uno de los sistemas geodésicos locales y geocéntricos, incluyendo los instantáneos ITRF (Ver sección respectiva)

### 3.5 Actualización del sistema

El sistema WGS 84 se ha ido desactualizando con el correr de los años. La serie de sistemas ITRF, en cambio, se modifican anualmente y han llegado a un orden de precisión muy superior. (ver sección respectiva)

Debido a esto, y teniendo en cuenta las mayores demandas del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, se han producido en los últimos años una serie de refinamientos y mejoras en el sistema, de manera de permitir su uso en las aplicaciones de muy alta precisión.

Este esfuerzo dio por resultado un marco de referencia para el WGS84 que es coincidente con ITRF92 dentro de los 10cm. Este marco de referencia mejorado se conoce como **WGS 84 (G730)**.

El único parámetro afectado por esta mejora fue  $GM = 3986004.418 \times 10^8 \text{m}^3\text{s}^{-2}$ . Comparado con el anterior, resulta una diferencia muy pequeña, dentro del error estándar del parámetro.

La mejora no ha tenido ningún efecto sobre el desarrollo de la cartografía. Sin embargo, se estudian otras modificaciones que incluyen nuevas definiciones del geoide, que resultarán en una mayor calidad de cartas y mapas.

### **3.6 Bibliografía del capítulo 3**

- Defense Mapping Agency. World Geodetic System 1984, Technical Report. December 1987.
- Malys and Slater. Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System 1984. Defense Mapping Agency.
- Misra, N., R. I. Abbot and E. M. Gaposchkin. Integrated Use of GPS and Glonass: Transformation Between WGS 84 and PZ-90 P. Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts Institute of Technology.
- Mueller, I. Gravimetric and Celestial Geodesy, A Glossary of Terms. Frederick Ungar Publishing Co.
- Caputo, M.. The Gravity Field of the Earth. Academic Press New York.

## Capítulo 4

### EL SISTEMA TERRESTRE INTERNACIONAL

---

#### 4.1 Introducción

Desde principios del siglo veinte han existido organismos internacionales cuya misión estaba íntimamente relacionada con la rotación de la Tierra, y como consecuencia inevitable, con la definición y materialización de un sistema de referencia terrestre respecto del cual se determina la posición variable del eje de rotación.

Así, el International Latitude Service, constituido por cinco estaciones astronómicas ubicadas sobre el paralelo de 39 grados de latitud norte, tenía la responsabilidad de determinar el movimiento del polo de rotación con respecto a la superficie terrestre. Para ello, se definió un polo medio "fijo" a la superficie materializado por las latitudes medias de estas estaciones fundamentales (Origen Convencional Internacional OCI). El advenimiento de nuevos instrumentos astronómicos y el interés de más países en contribuir con sus observaciones dio lugar al nacimiento del International Polar Motion Service que llegó a contar con casi un centenar de estaciones participantes.

El Bureau Internationale de l'Heure, agrupaba también a un importante número de estaciones cuya misión principal era determinar una escala de tiempo uniforme, para lo cual era indispensable definir un origen de las longitudes de las estaciones participantes.

El sistema de ejes materializado por las coordenadas astronómicas medias del conjunto de las estaciones participantes de estos servicios internacionales constituía una referencia adecuada para la medición de la rotación de la Tierra, pero de escasa aplicación práctica para satisfacer otras necesidades.

Estos organismos internacionales a menudo superponían sus responsabilidades. Además, la irrupción de nuevas técnicas para la determinación de la rotación de la Tierra en la década del setenta, consolidadas definitivamente en los ochenta, obligó a una redefinición de responsabilidades.

En este marco se establece el Internacional Earth Rotation Service (IERS) con una estructura compleja que comienza a funcionar a partir de 1988. Las técnicas observacionales que contribuyen a la materialización de sus productos son las siguientes:

- VLBI: medición de radiofuentes extragalácticas por medio de radiotelescopios.
- SLR: medición de distancias láser a satélites específicos desde telescopios especiales.
- LLR: medición de distancias láser a la Luna desde telescopios especiales.
- GPS: medición de distancias a satélites GPS con receptores específicos.
- DORIS: medición de variación de distancias desde satélites específicos a balizas orbitográficas.

Todas ellas aportan diferentes elementos para la solución de distintos problemas, que son combinados por el IERS para la producción de resultados aplicables a distintas disciplinas.

#### 4.2 Los productos del IERS

##### 4.2.1 Referencias terrestres para la geodesia, geodinámica y oceanografía

La definición actual del sistema de referencia terrestre (ITRS) es consistente con la anterior en cuanto procura que el eje polar medio de la Tierra este orientado en la misma dirección que el OCI y el origen de las longitudes sea común con el usado tradicionalmente (próximo al meridiano de Greenwich). Con esta definición, los parámetros de la rotación terrestre que se determinan actualmente están referidos al mismo sistema que los que se observaban desde hace un siglo aproximadamente.

Esta definición permite establecer una terna de ejes tales que el eje Z está dirigido al polo medio, el eje X, sobre el plano ecuatorial (perpendicular a Z) y dirigido al punto origen de las longitudes, y el eje Y sobre el mismo plano y perpendicular a los anteriores de forma tal que formen una terna derecha. El origen de este sistema es el baricentro de la Tierra, incluyendo a la atmósfera y la unidad de longitud es el metro.

La materialización de este sistema es un marco de referencia internacional (ITRF) constituido por un conjunto de coordenadas y velocidades geocéntricas de unas 180 estaciones con precisión de 1 a 3 cm en coordenadas y de 2 a 5 mm/año en velocidades.

El campo de velocidades es tal que la suma de las velocidades horizontales de todos los puntos que lo materializan es nula. Esto hace que, si bien cada punto está animado de una velocidad con respecto a los demás, el conjunto tiene velocidad cero. Lo contrario significaría aceptar que todo el marco de referencia está animado de una velocidad no nula.

#### **4.2.2 Referencias celestes para las ciencias de la Tierra y la astrofísica**

El sistema celeste de referencia ha sido definido de manera tal que no se producen discontinuidades con las definiciones tradicionales basadas en la posición del eje de rotación de la Tierra en el espacio, y en la intersección del ecuador y la eclíptica para definir el origen de la coordenada longitudinal.

No obstante, su materialización actual es muy diferente de los tradicionales catálogos estelares porque está compuesta por las coordenadas de un conjunto de objetos extragalácticos que por su distancia pueden considerarse realmente fijos en el espacio (ICRF). Estos objetos son observables con radiotelescopios en la modalidad de VLBI (interferometría de base muy larga).

Los sistemas espaciales específicos de cada técnica observacional son vinculados y referidos en última instancia al ICRF.

#### **4.2.3 Rotación terrestre para las ciencias de la Tierra**

La observación de objetos exteriores a la Tierra por las distintas técnicas que contribuyen al IERS (radiofuentes extragalácticas, la Luna o los satélites artificiales) permiten relacionar los sistemas celestes propios de cada disciplina con las posiciones terrestres de las estaciones de observación. Los parámetros geométricos que permiten vincular sistemas terrestres y celestes son los que definen la orientación de la Tierra (materializada por las coordenadas terrestres de las estaciones) en el sistema celeste espacial (materializado por las coordenadas de los objetos medidos). Es tarea fundamental del IERS la obtención de una única solución combinada con los datos de todas las técnicas tendiente a unificar todos los sistemas individuales.

Los parámetros resultantes permiten conocer el movimiento de la Tierra y sus variaciones que son interpretadas en términos de estructura y propiedades del interior de la Tierra,

dinámica de los océanos y la atmósfera, cambios globales, movimientos tectónicos y otros fenómenos geofísicos de gran importancia.

### 4.3 El sistema ITRF, un nuevo concepto de materialización

La precisión alcanzada en la determinación de coordenadas terrestres obliga a un cambio conceptual: no es posible materializar un sistema terrestre en base a coordenadas fijas, porque a nivel de la precisión centimétrica, ninguna estación ubicada sobre la superficie terrestre puede considerarse fija, todas están animadas de movimientos principalmente debidos a movimientos de las placas tectónicas en las que están asentadas.

En consecuencia, el ITRF está constituido por un conjunto de coordenadas y velocidades de las estaciones que lo materializan. Su continua evolución permite agregar nuevas estaciones cada año y mejorar la precisión general del conjunto. Por esa razón, cada nueva realización lleva indicado el año de su determinación, como también, la época fundamental a la cual se refieren las coordenadas listadas (p. ej. ITRF 93, ó ITRF 94, época 1993.0). Esto quiere decir que ITRF 93 difiere de ITRF 94 porque se ha agregado más información para calcular este último, lo que se traduce en pequeñas variaciones de posiciones y velocidades. En su conjunto, estas diferencias permiten encontrar parámetros de transformación entre las distintas materializaciones del sistema terrestre internacional.

Cabe mencionar que en la actualidad, estas transformaciones están en niveles milimétricos y por el momento no tienen importancia práctica para aplicaciones geodésicas convencionales.

Mucho más importante puede ser el efecto de las velocidades, no obstante, es importante no perder la dimensión del problema: este efecto debe ser considerado cuando se trabaja en redes regionales que involucran distintas placas tectónicas y, de manera especial, cuando se utilizan distintas estaciones con coordenadas ITRF definidas en una época original.

### 4.4 Discusión del nuevo concepto, un ejemplo

Supóngase que se realiza la medición de una red nacional de muy alta precisión con una época promedio de observación en 1997.5. Se decide procesar el material observacional local junto con las observaciones de un número apropiado de estaciones permanentes GPS distribuidas en todo el mundo. Se toman sus coordenadas y velocidades de ITRF 94 (por ejemplo), por lo que constituyen el marco de referencia gracias al cual la red nacional resulta también expresada en ITRF 94.

Cada estación que materializa al sistema tiene sus coordenadas fijas para una época determinada (por ejemplo, 1993.0):

|         |         |         |         |               |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| $X_0$   | $Y_0$   | $Z_0$   | ITRF 94 | época: 1993.0 |
| $dX/dt$ | $dY/dt$ | $dZ/dt$ | ITRF 94 | época: 1993.0 |

y se acompañan las componentes de la velocidad (d/dt) para la misma época.

Cuando se utilizan las observaciones de esas estaciones de referencia en un momento posterior, por ejemplo 1997.5, se deben utilizar las coordenadas del momento:

$$X = X_0 + (1997.5-1993.0).dX/dt$$

$$\begin{aligned} Y &= Y_0 + (1997.5-1993.0).dY/dt \\ Z &= Z_0 + (1997.5-1993.0).dZ/dt \end{aligned}$$

Las coordenadas que se obtienen están en el mismo sistema ITRF 94, pero en la época 1997.5. La red nacional procesada en este marco resultaría expresada en ITRF 94, época 1997.5.

#### 4.5 Bibliografía del capítulo 5

Altamimi, Z. Combinaison de techniques spatiales pour la determination et la maintenance d'un systeme de reference terrestre centimetrique, tesis doctoral. Observatorio de París, 1990.

IERS. Annual Report.

Moirano, J. y C. Brunini. Los Sistemas de Referencia Modernos, informe técnico. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 1997.

## Capítulo 5

### LA IMPORTANCIA DE LA GEORREFERENCIACIÓN

---

#### 5.1 Introducción

Los grandes cambios tecnológicos producidos en las dos últimas décadas unidos a las transformaciones políticas y económicas producidas más recientemente en nuestro país, están impactando fuertemente, como no podría ser de otra manera, en el pequeño mundo dentro del cual desenvolvemos nuestra actividad profesional. Entre estos cambios podemos citar:

- Los avances espectaculares en el campo de la informática que han permitido el desarrollo de nuevos soportes para el almacenamiento de enormes volúmenes de datos, procesadores cada vez más veloces y programas de gran potencia gráfica. En nuestro campo de trabajo estos avances se han manifestado principalmente a través de los conocidos sistemas de información geográfica (GIS).
- Una nueva tecnología de posicionamiento que hizo su aparición en el horizonte de los agrimensores y los geodestas para alcanzar en poco tiempo un desarrollo singular que aún continúa en expansión. No hace falta decir que nos referimos al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), cuyas aplicaciones se multiplican día a día.
- La demanda creciente ejercida por una sociedad cada vez más tecnificada sobre los recursos naturales y el medio ambiente que hace que cada vez sea más importante contar con información territorial precisa y actualizada.
- El apoyo económico prestado por organismos financieros internacionales para el desarrollo de programas de modernización que involucran directamente la producción, disponibilidad y uso de información territorial, como por ejemplo el Programa Provincias I, para la transformación de los catastros provinciales o el Proyecto de Asistencia al Sector Minero Argentino (PASMA).
- La transferencia desde el sector público al privado de grandes redes de distribución y comercialización de productos y servicios.

La lista anterior, seguramente incompleta, sirve de fondo para dar relieve a la discusión que sigue.

La difusión de los GIS y del GPS ha introducido en nuestro lenguaje cotidiano la palabra *georreferenciar*. Esta palabra de apariencia inofensiva encierra en verdad una serie de problemas, algunos de los cuales trataremos de discutir en este artículo. En un sentido abstracto, georreferenciar significa asignar *algún tipo de coordenadas ligadas al terreno* a los objetos de interés, sean estos naturales, obras de ingeniería, los vértices de una parcela, etc. No nos proponemos discutir los *distintos tipos de coordenadas* que pueden utilizarse con este propósito (curvilíneas, rectangulares, proyectivas, etc.), sus ventajas o inconvenientes. Es este un tema muy vigente y muy interesante que bien podría ser motivo de otra contribución, pero nuestro objetivo ahora es discutir qué entendemos por *ligadas al terreno*.

Adquirir la información que integrará la base de datos es la operación más laboriosa y costosa involucrada en el desarrollo de un GIS. Georreferenciar dicha base de datos es, por el contrario, una operación sencilla y de bajo costo relativo. Sin embargo, si se piensa que las coordenadas son el vehículo que permite que distintos usuarios superpongan en el GIS la capa de información de su interés, se advierte que de una georreferenciación correcta depende, en gran medida, el aprovechamiento que pueda hacerse del GIS y multiplica su valor de mercado por cuanto lo hace útil a un mayor número de usuarios.

La expresión *georreferenciación correcta* involucra varias condiciones, por ejemplo, que los procedimientos de medición y cálculo en base a los que se obtienen las coordenadas de los puntos de apoyo del levantamiento cumplan con ciertos estándares pre establecidos. Pero la condición más relevante y sine qua non es que dichas coordenadas estén vinculadas al mismo sistema de referencia. Y en este contexto la palabra "mismo" no reconoce fronteras: debe ser el mismo sistema de referencia en Mendoza, Buenos Aires, Jujuy o Tierra del Fuego. Debe ser el mismo sistema de referencia en la Argentina, Chile, Uruguay o Brasil.

## 5.2. El sistema de referencia único en la Argentina

La siguiente figura muestra esquemáticamente los distintos niveles de redes de control que materializan el sistema de referencia único en la Argentina.

A la izquierda se ilustra una situación ideal que podría alcanzarse en el país, a partir de un nuevo cálculo de la red POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas) y su vinculación a la red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) y, a través de ella, al sistema geocéntrico mundial ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional), así como de sus actualizaciones futuras y su implementación total.

A la derecha se ilustra la situación actual: El sistema POSGAR'94 algo desplazado respecto del sistema SIRGAS (en la figura se ha exagerado el pequeño desplazamiento existente), redes geodésicas provinciales no vinculadas a POSGAR '94 y numerosos levantamientos vinculados a sistemas geodésicos locales o sin ningún tipo de vinculación.



## Capítulo 6

### EL SISTEMA POSGAR

---

#### 6:1 Introducción

La modernización tecnológica unida a las transformaciones económicas y políticas producidas en la última década en nuestro país y en el mundo (ver capítulo 5), fueron agudizando paulatinamente la necesidad de materializar en el territorio argentino un sistema de referencia compatible con las nuevas condiciones.

A comienzos de la década del 90, especialistas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) y del Instituto Geográfico Militar (IGM) analizaban las posibilidades de materializar un nuevo marco de referencia utilizando observaciones GPS. Diversos trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales fueron producto de esas investigaciones y dieron lugar a recomendaciones de avanzar en la dirección de materializar un marco de referencia suficientemente preciso para las aplicaciones que se estaban desarrollando en el país y tan cercano como fuera posible al sistema global WGS84, utilizado por el GPS (ver, por ejemplo, "Una red GPS para el país: el proyecto POSGAR", R. Rodríguez, Revista del IGM, Año 4, N° 6, enero - diciembre de 1989/90). En ese contexto nace el proyecto POSGAR (POSiciones Geodésicas ARGentinas), cuyo principal objetivo fue materializar dicho marco de referencia.

Una circunstancia afortunada crea una oportunidad inmejorable para realizar las tareas de campo: un proyecto científico denominado Central Andes Project (CAP), liderado por dos universidades estadounidenses cuyo objetivo era el estudio de la geodinámica de los Andes centrales, se proponía medir con GPS una red de control de muy alta precisión, con numerosos puntos distribuidos mayoritariamente en el oeste del país, llegando hasta la latitud de aproximadamente  $-40^{\circ}$ . A cambio del apoyo logístico para realizar las mediciones, ofrecían sus receptores para la medición de la red POSGAR. Esta oportunidad no fue desaprovechada por el IGM y gracias a ello pudieron realizarse tres campañas de medición que dieron lugar a la red POSGAR:

- POSGAR 93: desde el 10 de febrero hasta el 12 de abril de 1993;
- CAP 93: desde el 11 de febrero hasta el 11 de marzo de 1993;
- POSGAR 94: desde el 8 de marzo hasta el 5 de mayo de 1994.

Por la misma época la comunidad de usuarios del sistema GPS se expandía en forma sostenida y ya había comenzado el desarrollo de importantes programas de modernización de los catastros provinciales, los que involucraban grandes inversiones solventadas mayoritariamente con créditos de organismos financieros internacionales. Estas circunstancias impusieron una condición adicional al desarrollo del proyecto: el nuevo marco de referencia debía estar disponible en el plazo más corto posible para proveer un sistema de referencia único para todo el país, al cual pudieran vincularse los nuevos levantamientos GPS, en especial las redes geodésicas provinciales que ya estaban en ejecución.

Era necesario entonces, realizar el cálculo de las observaciones que permitiera disponer de las nuevas coordenadas. Esta responsabilidad fue asumida por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP, contando para ello con el apoyo económico del Programa de Desarrollo Económico y Saneamiento Financiero de las Provincias Argentinas,

interesado en que los proyectos catastrales dispusieran del nuevo marco de referencia en el tiempo más breve posible.

Una decisión importante al momento de iniciar el cálculo fue decidir qué programa de procesamiento se utilizaría. Por un lado, los programas denominados “científicos” ofrecían la posibilidad de extraer de las observaciones la máxima precisión posible, pero su uso demandaba de una experiencia no suficientemente bien desarrollada en el país. Por otro lado, el uso de un programa “comercial” aseguraba la posibilidad de realizar un cálculo compatible con las precisiones requeridas y el tiempo disponible. Finalmente, se optó por esta última alternativa, lo que permitió disponer de las coordenadas que dieron lugar al actual marco de referencia POSGAR 94, a comienzos de 1995.

Los estimadores “internos” de precisión, esto es, los que se obtenían luego de compensar los vectores medidos, resultaron muy satisfactorios, mostrando una red homogénea con una precisión del orden de 1 parte por millón. Sin embargo, tuvo que transcurrir algún tiempo hasta poder disponer de controles “externos” que permitieran estimar de una forma más confiable la exactitud del marco de referencia POSGAR 94. Estos controles fueron aportados principalmente por el proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del SUR) y, en menor medida, por el proyecto geodinámico SAGA (South American Geodynamics Activities). Tales comparaciones confirmaron el acuerdo interno de la red obtenido mediante la compensación, pero además mostraron que POSGAR 94 materializa un sistema geocéntrico con una precisión mejor que un metro.

En mayo de 1997, mediante la Resolución 13/97, el IGM adoptó el marco de referencia POSGAR 94 como la materialización del sistema de referencia nacional. En resumen, el proyecto POSGAR permitió contar con una red de control geodésico compatible con las modernas tecnologías GIS y GPS, capaz de satisfacer las necesidades de la gran mayoría de los usuarios de geoposicionamiento. Es oportuno señalar otro producto importante del proyecto POSGAR que muchas veces no es valorizado en su justa medida: permitió desarrollar en el país la experiencia para manejar el problema complejo de establecer, controlar, mantener y perfeccionar un sistema de referencia moderno. Es importante comprender que estamos obligados a un perfeccionamiento constante que acompañe los cambios tecnológicos que el mundo moderno produce. En tal sentido, el proyecto POSGAR ha cumplido una meta importante, pero no ha finalizado.

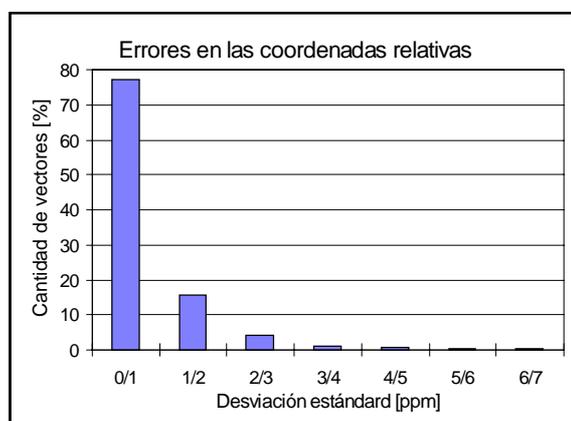
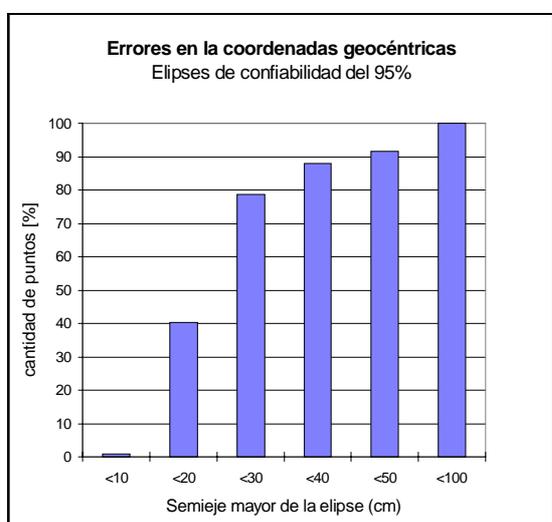
## **6.2 El sistema POSGAR 94**

La red POSGAR 94 materializa el Sistema Geodésico Mundial de 1984, WGS 84 (World Geodetic System of 1984) en el país. Esta obra pudo concretarse gracias a la cooperación de varias instituciones: el Instituto Geográfico Militar realizó la mayor parte de las tareas de campo; el Servicio de Hidrografía Naval colaboró con parte de ellas; un consorcio de universidades que por la época realizaba la medición de la red geodinámica CAP (Proyecto Andes Centrales) facilitó varios receptores GPS, proveyó las coordenadas de 19 puntos que sirvieron como control en la compensación final de POSGAR 94 y cedió las observaciones realizadas en todos los puntos argentinos de la red; la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata realizó el cálculo de las observaciones y el Programa Provincias I apoyó económicamente parte de las tareas de cálculo.

La red está compuesta de 127 puntos, separados en promedio por una distancia de 200 km, lo que asegura la posibilidad de que todas las redes geodésicas provinciales puedan vincularse a ella mediante por lo menos cuatro puntos ubicados dentro del territorio provincial o en sus cercanías.

El sistema de referencia fue materializado mediante las coordenadas de 19 puntos pertenecientes a la red CAP y un punto DORIS del Instituto Geográfico Nacional de Francia. Las coordenadas geocéntricas de estos puntos fueron transformadas del sistema ITRF 92 al WGS 84 y utilizadas como control en la compensación final de POSGAR 94. Los valores usados fueron obtenidos mediante comunicaciones personales, pues no hay valores publicados oficialmente.

Los cálculos se realizaron con programas y procedimientos estándares. Las figuras siguientes resumen la estimación de errores resultante de la compensación final de POSGAR 94. Puede verse que aproximadamente el 80 % de los puntos tienen un error en sus coordenadas geocéntricas inferior a 30 cm (3D-2s), mientras que aproximadamente el 80 % de los vectores compensados tienen un error relativo inferior a 1 parte por millón de su longitud (3D-1s).



## 6.3 El futuro del sistema POSGAR

### 6.3.1 El sistema SIRGAS

El proyecto SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur, fue establecido en octubre de 1993 durante la Conferencia Internacional para la Definición del Datum Geocéntrico Sudamericano, en Asunción, Paraguay. Cuenta con los auspicios de la Asociación Internacional de Geodesia, el Instituto Panamericano de Geografía e Historia y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía de los Estados Unidos de América.

Las mediciones GPS fueron realizadas en mayo/junio de 1995, a lo largo de 10 días consecutivos en un verdadero ejemplo de trabajo cooperativo en el que participaron coordinadamente cientos de personas y decenas de instituciones de todos los países que integran el proyecto.

Los cálculos fueron realizados independientemente por el Instituto de Investigaciones Geodésicas de Alemania y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía de los Estados Unidos de América. Un científico argentino participó en el procesamiento que realizó la primera de estas instituciones.

Los errores en las coordenadas geocéntricas de los puntos SIRGAS son del orden de 1 centímetro. El sistema de referencia elegido para la solución definitiva fue el ITRF 94 y la época de las coordenadas, se hizo coincidir con la época media de observación, es decir, 1995.4. La red está compuesta por 57 puntos, 10 de los cuales se encuentran en la Argentina.

El proyecto SIRGAS difundió también los procedimientos que los países deberán seguir para obtener redes geodésicas GPS con la más alta precisión y compatibilidad. Esto último implica que todas las redes nacionales queden establecidas en el mismo sistema de referencia y época.

### 6.3.2 El sistema POSGAR 98

Con vistas a la integración POSGAR-SIRGAS, se ha realizado un nuevo cálculo de la red POSGAR, ajustado a las especificaciones oportunamente impartidas por el proyecto SIRGAS.

Seis de los diez puntos argentinos de SIRGAS son comunes con POSGAR'94, lo que permitió una comparación directa de las coordenadas, obteniendo los resultados que se muestran en las dos tablas siguientes.

| <i>PUNTO</i> | <i>LAT</i><br>[cm] | <i>LON</i><br>[cm] | <i>ALT</i><br>[cm] |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| LOTE 10      | 48                 | 53                 | -14                |
| LOTE 24      | 49                 | 14                 | -17                |
| MAITEN       | 40                 | 26                 | 34                 |
| MORRO        | 50                 | 24                 | 41                 |
| V. ROBLES    | 52                 | 23                 | 4                  |
| R. GRANDE    | 83                 | 33                 | -128               |

Coordenadas geocéntricas

| <i>VECTOR</i><br>LOTE 10 | <i>LONGIT</i><br><i>UD</i><br>(KM) | <i>DIF'CIA</i><br>(PPM) |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| LOTE 24                  | 900                                | 0.04                    |
| MAITEN                   | 498                                | -0.01                   |
| MORRO                    | 1438                               | 0.04                    |
| V. ROBLES                | 2040                               | -0.01                   |
| R. GRANDE                | 862                                | 0.31                    |

Vectores

Puede verse que la diferencia entre las coordenadas absolutas apenas supera el metro, mientras que las coordenadas relativas muestran diferencias por debajo de 1 parte por millón de la longitud del vector. Si bien estos resultados no pueden generalizarse a todos los puntos POSGAR, la comparación constituye un resultado excelente desde dos puntos de vista diferentes:

- Muestra que POSGAR 94 materializa un marco de referencia de muy buena calidad, tanto en su posicionamiento geocéntrico como en su precisión relativa.
- Permite inferir que las coordenadas POSGAR 94 sufrirán variaciones pequeñas, prácticamente imperceptibles para la gran mayoría de las aplicaciones prácticas, cuando se realice la vinculación con SIRGAS.

La precisión de una red geodésica no constituye un bien en sí mismo, sino en la medida que la hace útil a nuevos y más variados usuarios. Mientras que una red de alta precisión puede satisfacer las necesidades de los usuarios que sólo requieren baja precisión, lo inversa es a todas luces falso. Si bien la diferencia entre los sistemas POSGAR 94 y un POSGAR 98 serán imperceptibles para la mayoría de los usuarios, el refinamiento del sistema permitirá su uso en aplicaciones más exigentes, como por ejemplo, brindar un marco de referencia preciso para grandes redes de control como las que se están ejecutando en el marco del proyecto PASMA, o las que serán necesarias para la definición de un nuevo datum vertical para el país.

#### **6.4 Conclusiones**

De una georreferenciación correcta depende, en gran medida, el aprovechamiento que pueda hacerse de un SIG/SIT y también su valor de mercado por cuanto lo hace útil a un mayor número de usuarios. Tal condición sólo puede cumplirse si las coordenadas de apoyo de todos los levantamientos están vinculadas al mismo sistema de referencia, lo que solamente queda garantizado a través del uso de POSGAR 94.

POSGAR 94 materializa mediante 127 puntos distribuidos en el país un marco de referencia de muy buena calidad, cuyo posicionamiento geocéntrico tiene una exactitud del orden de 1 metro y cuya precisión relativa es del orden de 1 parte por millón.

Un nuevo POSGAR (98 u otro) constituirá un refinamiento en la exactitud de POSGAR 94. La vinculación con SIRGAS asegurará un posicionamiento geocéntrico con una exactitud de pocos centímetros y un nuevo cálculo de las observaciones mediante procedimientos científicos brindará una mayor precisión relativa.

Los cambios que estos refinamientos producirán en las actuales coordenadas POSGAR 94 serán prácticamente irrelevantes para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Se estima que las coordenadas geocéntricas podrán cambiar en el orden de 1 metro, mientras que las coordenadas relativas sufrirán en la gran mayoría de los casos variaciones inferiores a 1 parte por millón.

Hasta tanto se publiquen las coordenadas POSGAR 98 todos los levantamientos deben vincularse a POSGAR 94. En el futuro, la transformación de coordenadas entre ambos sistemas podrá realizarse mediante parámetros de transformación que preservarán la precisión del actual marco de referencia POSGAR 94.

## Capítulo 7

# TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS

---

### 7.1 Introducción

La transformación de coordenadas entre sistemas de referencia distintos es un problema que aparece frecuentemente en la Agrimensura y la Geodesia. Antes de abordar el tema, conviene diferenciar las dos etapas que, unidas, conllevan a la solución global del problema:

- a) determinar los parámetros de transformación;
- b) transformar las coordenadas.

Puede ocurrir que la etapa a) no sea necesaria, porque se dispone de parámetros de transformación previamente determinados. Sin embargo, es útil entender conceptualmente los problemas que presenta la determinación de parámetros de transformación, para comprender las limitaciones con que los mismos pueden ser aplicados. Si bien la etapa a) precede a la b), por razones didácticas, la discusión se aborda en el orden inverso.

Un caso particular es la transformación de coordenadas del sistema Campo Inchauspe 69 al sistema POSGAR 94. Este problema es discutido en el último punto del presente capítulo.

### 7.2 Transformación de coordenadas

#### 7.2.1 Coordenadas rectangulares

La forma más general de transformar las coordenadas rectangulares es mediante el uso de una transformación de siete parámetros:

- las tres translaciones entre los orígenes,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ;
- las tres rotaciones entre los ejes,  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ;
- la diferencia de escala,  $S$ .

Las expresiones matemáticas pueden encontrarse, por ejemplo, en "Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic systems", DMA Technical Report 8350.2, 1987.

Se debe prestar especial atención al signo y las unidades de los parámetros. Los que permiten pasar del sistema A al B tienen igual valor absoluto pero signo opuesto a los que permiten pasar del B al A. Habitualmente las translaciones se dan en metros, las rotaciones en segundos de arco y la escala en partes por millón, pero no son infrecuentes las excepciones.

Puede ocurrir que no se disponga de los siete parámetros sino, por ejemplo, de las tres translaciones solamente. Este es un caso particular de la transformación de siete parámetros, en el que las rotaciones y la diferencia de escala asumen el valor 0. En tal caso, la transformación se reduce simplemente a:

$$\begin{aligned} X_B &= X_A + \Delta X \\ Y_B &= Y_A + \Delta Y \\ Z_B &= Z_A + \Delta Z \end{aligned}$$

### 7.2.2 Coordenadas geodésicas

Hasta ahora nos hemos referido a las coordenadas rectangulares. Sin embargo, las más frecuentemente usadas en la práctica no son éstas, sino las geodésicas (también reconocidas como geográficas). Dos alternativas son posibles en este caso para realizar la transformación:

Usando una transformación de siete parámetros:

- 1) Transformar  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  a  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (el sistema de referencia no cambia, continua siendo el A, por lo tanto, en la transformación debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema A).
- 2) Transformar  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  del sistema A al B mediante la transformación de Siete parámetros.
- 3) Transformar  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  a  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  (el sistema ha cambiado, ahora es el B, por lo tanto debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema B).

Un problema que se presenta frecuentemente es carecer de alturas geodésicas. Si se dispone de alturas sobre el nivel del mar, el inconveniente puede salvarse convirtiéndolas en geodésicas mediante la adición de la ondulación del geoide; de lo contrario, no queda otra posibilidad que asumir un valor aproximado mediante una hoja topográfica. Ambas alternativas introducen errores en la transformación, siendo preferible la primera.

Más detalles sobre el problema altimétrico pueden verse en el capítulo 8.

Los errores en la altura tienen un efecto pequeño sobre la latitud y la longitud. La tabla siguiente muestra la transformación de las coordenadas de un punto del sistema Inchauspe 69 al WGS 84 ( $\Delta X = -148$  m,  $\Delta Y = 136$  m,  $\Delta Z = 90$  m), usando la altura correcta (1000 m) y usando  $h=0$ .

| Inc. 69                    | WGS 84<br>Usando el valor correcto de<br>$h$ | WGS 84<br>Usando $h=0$     | ERROR<br>[metros]       |
|----------------------------|--|----------------------------|-------------------------|
| $\phi = -36$               | $\phi = -35\ 59\ 58.4366$                    | $\phi = -35\ 59\ 58.4363$  | $\Delta\phi = -0.009$   |
| $\lambda = -62\ 0\ 2.6678$ | $\lambda = -62\ 0\ 2.6678$                   | $\lambda = -62\ 0\ 2.6683$ | $\Delta\lambda = 0.013$ |

Usando las fórmulas de Molodenski

Las fórmulas de Molodenski permiten convertir directamente las coordenadas curvilíneas sin pasar por las rectangulares. Sus expresiones pueden encontrarse, por ejemplo, en DMA Technical Report 8350.2, 1987, ya citado.

En ellas interviene, además de las tres translaciones entre los orígenes,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , el semieje mayor,  $a_A$ , y el aplastamiento,  $f_A$ , del elipsoide asociado al sistema A y las diferencia con los del sistema B,  $\Delta a = a_B - a_A$  y  $\Delta f = f_B - f_A$ .

Las fórmulas de Molodenski toman en cuenta las translaciones del origen y las diferencias tamaño y forma de los elipsoides asociados a los sistemas A y B, pero ignoran las rotaciones entre los ejes y la diferencia de escalas.

### 7.2.3 Coordenadas Gauss Krüger

1) Transformar  $x$ ,  $y$  a  $\phi$ ,  $\lambda$  (el sistema de referencia no cambia, continua siendo el A, por lo tanto, en la transformación debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema A. El meridiano central debe ser el mismo que se usó en la carta de donde se extrajeron las coordenadas originales).

2) Transformar  $\phi$ ,  $\lambda$  del sistema A al B, mediante alguno de los procedimientos descriptos previamente (usando  $h=0$ ).

3) Transformar  $\phi$ ,  $\lambda$  a  $x$ ,  $y$  (el sistema ha cambiado, ahora es el B, por lo tanto, en la transformación debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema B. El meridiano central puede ser el mismo o bien puede cambiar a causa de la transformación).

Más detalles sobre las coordenadas proyectivas pueden verse en el capítulo 9.

El siguiente ejemplo involucra las distintas transformaciones descriptas.

| SISTEMA | GAUSS KRÜGER<br>(Meridiano central $-63^\circ$ )           | GEODÉSICAS   | RECTANGULARES  |
|---------|--|--|--|
| CAI69   | $x = 6016219.15 \text{ m}$<br>$y = 4590169.10 \text{ m}$ → | $\phi = -36^\circ 0' 0''.0000$ →<br>$\lambda = -62^\circ 0' 0''.0000$<br>$h = 0.000 \text{ m}$ | $X = 2425396.84 \text{ m}$<br>$Y = -4561508.03 \text{ m}$<br>$Z = -3728250.47 \text{ m}$ |
|         |  | ↓  | ↓  |
| PGA94   | ← $x = 6016009.47 \text{ m}$<br>$y = 4590097.80 \text{ m}$ | ← $\phi = -35^\circ 59' 58''.4350$<br>$\lambda = -62^\circ 0' 2''.7075$<br>$h = 13.128$        | $X = 2425247.94 \text{ m}$<br>$Y = -4561372.43 \text{ m}$<br>$Z = -3728160.37 \text{ m}$ |

Las transformaciones fueron hechas usando los tres parámetros  $\Delta X = -148.9$ ,  $\Delta Y = 135.6$ ,  $\Delta Z = 90.1$ .

### 7.3 Determinación de parámetros de transformación

Hasta ahora hemos tratado a la transformación de coordenadas entre los sistemas A y B como un problema puramente geométrico que se resuelve mediante siete parámetros, los que toman en cuenta las translaciones del origen, las rotaciones de los ejes y la diferencia de escalas.

Un problema distinto es el de determinar los parámetros de transformación que luego serán usados para convertir las coordenadas del sistema A al B. Para determinar tales parámetros es necesario disponer de un conjunto de puntos "comunes", cuyas coordenadas A y B sean conocidas. El procedimiento habitual es ajustar los parámetros hasta que las coordenadas A

convertidas, difieran de las B lo mínimo posible. El criterio para establecer que entendemos por “mínimo posible”, usualmente lo provee el método de mínimos cuadrados.

### 7.3.1 Efecto de los errores en las coordenadas

El primer aspecto que debemos tener en claro es que para determinar los parámetros de transformación estamos utilizando coordenadas afectadas de errores y estos errores se propagaran inevitablemente a los parámetros de transformación. Para poder avanzar en la discusión es necesario afinar algo más el concepto de error; dos tipos de errores deben ser, en principio, considerados:

- a) aquéllos que se distribuyen al azar por toda la red, negativos y positivos, grandes y pequeños, sin que haya una ley que los organice geográficamente; y
- b) aquéllos que se propagan sistemáticamente a lo largo de una red, siguiendo cierta ley (generalmente desconocida) que les provee un ordenamiento geográfico determinado.

El efecto de los errores del tipo a) puede reducirse usando la mayor cantidad de puntos comunes posible. Es recomendable también que los puntos comunes tengan una distribución geográfica homogénea tanto en el sentido norte-sur como este-oeste, pues ello contribuye a una menor propagación de los errores de las coordenadas a los parámetros.

La consecuencia de los errores del tipo b) es que no son suficiente siete parámetros para describir la transformación.

### 7.3.2 Las fórmulas de regresión múltiple

Las fórmulas de regresión múltiple son una alternativa para plantear transformaciones con un mayor número de parámetros. La forma general es:

$$\alpha_A = \alpha_B + A_0 + A_{10}U + A_{01}V + A_{20}U^2 + A_{02}V^2 + A_{11}UV + A_{30}U^3 + A_{03}V^3 + A_{21}U^2V + A_{12}UV^2 + \dots$$

donde:

- $\alpha$  representa una cualquiera de las coordenadas X, Y, Z o  $\phi$ ,  $\lambda$ , h;
- U y V son funciones de la latitud y la longitud del punto que se está transformando;
- $A_{ij}$  son coeficientes cuyos valores se determinan por mínimos cuadrados.

Estas fórmulas son más “flexibles” que la transformación de siete parámetros ya que pueden representar los errores sistemáticos de una red geodésica extensa en forma localizada, dependiente de la latitud y la longitud.

La principal dificultad que presentan radica en decidir que coeficiente debe incluirse y que coeficientes deben descartarse. Por ejemplo, podría ocurrir que el coeficiente  $A_{34}$  carezca de significación y deba ser descartado, mientras que el coeficiente  $A_{25}$  juegue un rol muy importante. Esta tarea se realiza empíricamente, quitando y agregando coeficientes y juzgando la significación de cada parámetros que se agrega o se quita mediante test estadísticos apropiados. Más detalles sobre este tipo de fórmulas pueden verse en “El problema de la determinación de parámetros de transformación”, C. Brunini, J. Olondriz y R. Rodríguez, Actas del IV Congreso Internacional Ciencias de la Tierra, 5 al 9 de agosto, Santiago, Chile.

Los coeficientes que se determinaron basándose en un cierto número de puntos comunes son luego usados para transformar las coordenadas de otros puntos que no lo son. Un problema delicado es chequear los errores que se cometen en estos puntos no comunes. Como regla general debe recalarse que la transformación es apta para interpolar dentro de la región de los puntos comunes, pero debe ser usada con extremo cuidado, cuando se intenta extrapolar fuera de dicha región.

#### **7.4 La transformación Inchauspe 69 --> POSGAR 94**

El marco de referencia POSGAR 94 ha reemplazado al marco de referencia clásico Inchauspe 69 al que se vinculó la mayor parte de los levantamientos cartográficos realizados por el IGM.

##### **7.4.1 La situación actual**

El procedimiento habitual para convertir las coordenadas  $\phi$  y  $\lambda$  del sistema Inchauspe 69 al POSGAR 94 ha sido utilizar las fórmulas de Molodenski, introduciendo en ellas los valores  $\Delta a$  y  $\Delta f$  antes mencionado y las constantes de transformación:

$$\Delta X = -148 \text{ m} \quad \Delta Y = 136 \text{ m} \quad \Delta z = 90 \text{ m}$$

Estas constantes reflejan los desplazamientos entre los orígenes de los sistemas Inchauspe 69 y WGS84, sus valores fueron determinados por la Agencia Cartográfica de Defensa de los Estados Unidos de América (hoy Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía) utilizando 19 puntos pertenecientes a Inchauspe 69, cuyas coordenadas WGS84 se obtuvieron a partir de observaciones satelitarias realizadas con el sistema TRANSIT (ver DMA Technical Report 8350.2, 1987, ya citado).

Si bien no han sido muy usadas, la Agencia Cartográfica de Defensa determinó también los coeficientes de fórmulas de regresión múltiple para la latitud y la longitud, pero su aplicación conduce a resultados deficientes a causa de la poca cantidad de puntos utilizados en el cálculo.

##### **7.4.2 Perspectivas para el futuro**

En la actualidad existen alrededor de 50 puntos comunes entre los marcos de referencia Inchauspe 69 y POSGAR 94, con una distribución geográfica que abarca la mayor parte del país. Estos puntos permitieron comprobar la exactitud de la transformación de tres parámetros utilizada hasta el presente.

Investigaciones recientes han demostrado la posibilidad de establecer una transformación más precisa mediante fórmulas de regresión múltiple (ver "El problema de la determinación de parámetros de transformación", R. Rodríguez, J. Olondriz y C. Brunini, Actas del IX Congreso Nacional y IV Latinoamericano de Agrimensura, Carlos Paz, Córdoba, 5 al 9 de mayo de 1997).

## Capítulo 8

### EL PROBLEMA ALTIMÉTRICO

---

#### 8.1 Introducción

Cuando se efectúan relevamientos por medios satelitales, por ejemplo con posicionadores GPS, el problema altimétrico debe ser tratado cuidadosamente. Las alturas que se obtienen con GPS ( $h$ ) están referidas a un determinado elipsoide y tienen un claro significado geométrico:  $h$  es la distancia del punto relevado respecto de la superficie del elipsoide medida a lo largo de la normal al mismo.

En cambio las cotas que se obtienen de una red de nivelación convencional ( $H$ ), por ejemplo las redes de nivelación del Instituto Geográfico Militar, en primera aproximación pueden considerarse alturas con respecto al Nivel Medio del Mar (geoide). Sin embargo, esto es rigurosamente cierto solo si se corrigen las observaciones por mediciones de gravedad, según se explica más adelante.

La relación entre ambas es la siguiente:  $N = h - H$  (1)

siendo  $N$  la ondulación del geoide respecto del elipsoide de referencia.

Resulta claro que si se dispone de un modelo (de geoide) a partir del cual calcular valores de  $N$  para cualquier sitio, la expresión (1) permite transformar alturas elipsoidales ( $h$ ) obtenidas con GPS, en alturas sobre el nivel medio del mar haciendo  $H = h - N$ .

#### 8.2 La altura elipsoidal $h$

La obtención de la altura elipsoidal no es una tarea elemental. Es necesario tener muy claro en que sistema de referencia se obtienen las coordenadas GPS y a que elipsoide está referida la altura. En principio habría que utilizar el sistema POSGAR-94, que a nivel nacional se aproxima al sistema WGS-84, que es el utilizado por el GPS.

Este punto es muy delicado porque como se puede advertir en (1), las ondulaciones del geoide ( $N$ ) también se refieren a un sistema determinado (y a un elipsoide asociado) que tiene que ser el mismo que el utilizado para el cálculo de  $h$ .

La precisión con que se obtienen las alturas elipsóidicas ( $h$ ) mediante observaciones GPS diferenciales depende de una serie de factores, algunos de los cuales inciden también en la precisión planimétrica (ver Estandares Geodésicos). En general se ha observado en redes de alta precisión que los errores de  $h$  son algo mayores que los observados para la latitud y longitud (entre 1,5 y 2 veces más grandes).

#### 8.3 La cota $H$ sobre el nivel medio del mar (geoide)

El 70% de la tierra, la superficie media de los océanos, materializa una superficie de nivel del campo de gravedad terrestre (superficie de potencial gravitatorio constante o equipotencial). Se puede suponer que está extendida debajo de los continentes y determinada por la atracción producida por la distribución desigual de las masas terrestres.

A esta superficie se la designa como GEOIDE y se la puede definir como la superficie de nivel que mejor se ajusta al nivel medio del mar.

El geoide no es una superficie analítica, por lo que no es apto como referencia para la determinación de posiciones. En cambio, sí es adecuado como superficie de referencia para diferencias de potencial o altura, dadas por nivelación directa (geométrica) en combinación con mediciones de gravedad.

Para establecer el origen del geoide como una superficie de referencia para las alturas, el nivel del agua del océano se registra en áreas costeras utilizando aparatos registradores de marea (mareógrafos), y se promedia para períodos largos, idealmente unos 19 años. El nivel medio del mar así obtenido representa una aproximación al geoide. En nuestro país el origen lo proporcionó el mareógrafo ubicado en el puerto de Mar del Plata, y constituye el 0 (cero) oficial de nuestro país.

En la actualidad se está analizando el origen de la red de nivelación argentina mediante la vinculación altimétrica de la misma a varios mareógrafos ubicados a lo largo de la costa (D'Onofrio et al, 1981).

Las cotas publicadas por el IGM son en muchos casos, cotas geométricas compensadas (ver public. IGM en referencias). Es decir que los resultados de los desniveles medidos se compensaron de forma que "cierren" los anillos y polígonos. Sin embargo para que dichas cotas puedan considerarse ALTURAS ORTOMETRICAS, respecto del geoide, se requiere que las mismas se corrijan con mediciones de gravedad para compensar la falta de paralelismo de las superficies equipotenciales a lo largo de la trayectoria. Algunas redes de alta precisión del IGM han sido recalculadas utilizando valores de gravedad normal (que es función de latitud en el elipsoide de referencia elegido) obteniendo así ALTURAS ORTOMÉTRICAS TEÓRICAS.

En regiones llanas el efecto de esta corrección ortométrica sobre las cotas geométricas no es significativo (unos pocos milímetros), pero sí puede ser importante en zonas montañosas (algunos decímetros). Sin embargo esta afirmación debe tomarse con mucha precaución porque para estar seguro de la realidad de una región, es necesario calcular la magnitud de las correcciones con datos gravimétricos reales.

Cabe aclarar que tanto la ausencia de corrección ortométrica como la posibilidad de que exista un error en el origen de las redes de nivelación en uso, afectan de igual forma a los levantamientos altimétricos tradicionales como a los satelitales. Es decir que un trabajo de nivelación que toma como origen un punto de la red altimétrica, tiene desde el comienzo los mismos errores que el punto de partida cualquiera sea la técnica empleada.

#### **8.4 Los modelos de geoide**

Los modelos de geoide disponibles para nuestro país, son modelos globales, es decir que ajustan observaciones de distinto tipo a lo largo de todo el mundo y producen una solución a escala global. Este tipo de modelos, cuya precisión ha ido en rápido aumento en los últimos años, tienen poca resolución. Esto significa que no pueden dar cuenta de las ondulaciones del geoide que se producen a escala de pocos kilómetros. Los de uso más frecuente son los desarrollados en la Ohio State University denominados OSU89 y OSU91A (Rapp et al, 1991), y más recientemente, el modelo EGM96 de NIMA (Lemoine et al, 1996).

Estos modelos constituyen una buena referencia general y se pueden tomar como base para desarrollos localizados. Se está trabajando en el desarrollo de un geoid regional mas apropiado para la zona (Blitzkow et al, 1997; Gil et al,1997; Font et al, 1997).

### **8.5 Metodología GPS para el análisis de un modelo de geoid**

Se mide una red GPS sobre puntos de nivelación cuya H sea conocida. La red GPS debe tener un origen bien definido (POSGAR-94), una estructura y una metodología de medición (tiempos de ocupación, equipamiento, software, etc.), que dependen de la precisión que se desea alcanzar en la determinación de h.

Se calculan las ondulaciones puntuales del geoid a partir de la ecuación (1).

$$\text{Nobs} = h - H$$

Se comparan los valores obtenidos (Nobs) con los que se obtienen del modelo existente (Ncal), por ejemplo con el OSU91a o el EGM96.

Cabe esperar que haya apartamientos sistemáticos entre Nobs y Ncal debido a los problemas de origen mencionados en los puntos 1 y 2, las correcciones ortométricas ausentes en H, como también los que provienen del propio modelo global. En tal caso, puede estimarse una diferencia media y eliminarla de todas las diferencias individuales (desviaciones respecto del promedio).

Lo que interesa analizar son las variaciones de las diferencias Nobs-Ncal. Si estas son grandes en relación con la precisión deseada, es evidente que el modelo no ajusta correctamente las ondulaciones de N en la región. Es necesario contar con una red GPS suficientemente densa para describir apropiadamente las correcciones a aplicar a Ncal sobre toda la zona. Si las diferencias se mantienen constantes o suavemente variables (como para permitir una interpolación sencilla), entonces se pueden utilizar directamente las diferencias así calculadas para corregir los valores del modelo en la zona de trabajo. Varios trabajos sobre el particular se pueden encontrar en Perdomo et al, 1997 y 1998.

### **8.6 Cotas Geopotenciales**

Las alturas definidas hasta aquí no son geopotenciales. Puntos de igual altura elipsoidal o de igual altura ortométrica no necesariamente pertenecen a la misma superficie de nivel.

La definición de cota geopotencial se puede obtener también a partir de las observaciones gravimétricas. La cota geopotencial se mide en unidades de gravedad por metro ( $\text{Gal} \times \text{m}$ ), y suele dividirse por un valor de gravedad fijo a efectos de obtener un valor de cota en metros.

### **8.7 Tipos de alturas**

El problema planteado y la metodología expuestos en este capítulo tienen, en muchos aspectos, un carácter local o nacional. Es conveniente, asimismo, tener presentes los esfuerzos de cooperación internacional en la búsqueda de la necesaria homogeneidad de tratamiento. Así es que 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 los

países de la América del Sur. Es por ello que se incluyen como anexo, al final del documento, las definiciones elaboradas por dicho grupo.

## **8.8 Bibliografía del capítulo 8**

- Blitzkow D., Lobianco M. & Fairheard J. Efforts toward a 10' geoid for South America I.A.G. Gen. Ass. Río de Janeiro, Proceedings en prensa, 1997.
- D'Onofrio, E.E., Frutos H.C. y Balay C. Nivel Medio del Mar en el Litoral Argentino. Informe Técnico N° 6/81. Servicio de Hidrografía Naval, 1981.
- Font G., Paccino M C, Blitzkow D & Tocho C. A preliminary geoid model for Argentina. I.A.G. Gen. Ass. Río de Janeiro, Proceedings en prensa, 1997.
- Gil M., Lugones A., Font G. y Usandivaras J. Aportes a la confección del geoide de la Provincia de Buenos Aires. Actas 19ª. Reunión Científica de Geofísica y Geodesia, AAGG. San Juan, Octubre 1997.
- Heiskanen W. & Moritz H. Physical Geodesy. Freeman, 1967
- Instituto Geográfico Militar. Anuarios del.
- Instituto Geográfico Militar. Publicación Técnica IT6a.
- Instituto Geográfico Militar. Publicación Técnica ITTC Fascículo V : Gravimetría.
- Lemoine F. et al. The development of the NASA GSFC IAG Symposium of Gravity, Geoid and Marine Geodesy. Tokyo, en prensa, 1996.
- NIMA Joint Geopotential Model IAG. Symposium of Gravity, Geoid and Marine Geodesy. Tokyo, en prensa, 1996.
- Perdomo R., Del Cogliano D., Mondinalli C., Decimetric Geoid for Buenos Aires Province based on GPS and models. IAG General Assambly. Río de Janeiro, proceedings en prensa, 1997.
- Perdomo R., Del Cogliano D., Rivas G., Cornaglia L., Jimenez B., Huerta E. y Noguera G. Altimetría con GPS en el Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. 4tas. Jornadas Geofísicas y Geológicas Bonaerenses, 1998.
- Perdomo R., Del Cogliano D., Rivas G., Cornaglia L., Jimenez B., Huerta E. y Noguera G. Modelado de geoide basado en GPS, análisis crítico. Congreso Ciencias de la Tierra. Santiago, Chile, agosto, 1998.
- Rapp R., Wang Y., & Pavlis N. The Ohio State University Geopotential and Sea Surface Topography Harmonics Coefficient Models. Report 410 Department of Geodetic Science and Surveying. The Ohio State University, 1991

## Capítulo 9

### LOS SISTEMAS DE PROYECCIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA

---

#### 9.1 Proyecciones conformes

Las proyecciones conformes tienen la particularidad de conservar, como su nombre lo dice, las formas. Es decir que los ángulos, dentro de un entorno reducido, son iguales a los del terreno. Son apropiadas para muchas aplicaciones, salvo las que requieren realizar una evaluación de un fenómeno areal. De todos modos si resulta necesario determinar la superficie de un polígono puede calcularse fácilmente la deformación areal producida por la proyección.

#### 9.2 Gauss-Krüger

La proyección Gauss-Krüger está definida como conforme, cilíndrica y transversa. Conforme por lo expresado previamente, cilíndrica pues se trata de una transferencia analítica del terreno a un cilindro tangente al elipsoide de referencia. La tangencia al producirse sobre un meridiano le imprime la condición de transversa o transversal.

Fue concebida por Carlos Federico Gauss para el territorio alemán y para atenuar sus deformaciones al alejarse del meridiano de tangencia, Johannes Heinrich Louis Krüger propuso su división en bandas o fajas.

En la Argentina fue adoptada mediante la Disposición Permanente Nro. 197 (24 abril 1925) del Instituto Geográfico Militar. Las ventajas de la proyección, en la modalidad elegida, fueron ampliamente desarrolladas en la Primera Conferencia de Coordinación Cartográfica, celebrada en Buenos Aires en 1936.

La idea básica era desarrollar una cartografía en la que las deformaciones fueran insensibles para la escala 1:25000 en el borde de las fajas. Fue así que se establecieron 7 fajas de tres grados de ancho cada una. Con este temperamento en la latitud  $-22^{\circ}$  (la más norteña del país) el módulo de deformación (m) a  $1.5^{\circ}$  del meridiano central resulta 1.000295 que significan 0.30 metros en 1 km y se satisface la premisa. La deformación superficial (areal) se resuelve aplicando el módulo de deformación elevado al cuadrado.

Las fórmulas de transformación de coordenadas geográficas a planas y viceversa fueron ampliamente difundidas por la literatura geodésica y cartográfica y tienen dos partes: el cálculo del arco de meridiano y de las abscisas y ordenadas. En ambos casos están presentes los parámetros del elipsoide de referencia que deben ser tenidos en cuenta, particularmente en el momento actual, donde coexisten el elipsoide Internacional de 1924 y el WGS 84.

La proyección Gauss-Krüger se convirtió en el país en sinónimo de sistema de referencia, lo que constituye un error bastante frecuente entre los usuarios de los productos cartográficos. Es preciso reiterar que el sistema de referencia puede ser Campo Inchauspe 1969 u otros (Castelli, Pampa del Castillo, Carranza, etc) y ahora POSGAR 94 asociado con WGS 84.

Los recaudos a tener en cuenta al efectuar los cálculos de poligonales a partir de un punto de coordenadas planas Gauss-Krüger son los siguientes:

- Módulo de deformación ( $m$ ), es la relación entre la distancia en la carta y su correspondiente en el terreno. Su valor es mayor que la unidad y la distancia (debidamente corregida y reducida al elipsoide) debe ser multiplicada por el módulo (tabla 1 al final del capítulo).
- Convergencia plana de meridianos ( $g$ ), es el ángulo que forma la imagen del meridiano del punto con la paralela al meridiano central. Es necesario tener presente su valor para la conversión de acimutes geodésicos a planos y viceversa (tabla 2 al final del capítulo).
- Corrección arco-cuerda o reducción de acimut ( $d$ ), es el ángulo entre la curva imagen de la geodésica y la cuerda correspondiente (tabla 3 al final del capítulo).

Estas correcciones deben ser realizadas antes de efectuar un traslado de coordenadas planas y su compensación.

### 9.3 Coordenadas múltiples

Definido un marco de referencia - POSGAR 94 en el caso argentino - las coordenadas geodésicas para cada punto son únicas. Sin embargo el mismo punto puede tener dos juegos de coordenadas planas: uno correspondiente a la faja propia Gauss-Krüger y el otro a la faja vecina. Esta situación se da habitualmente cuando el punto en cuestión se encuentra próximo al meridiano límite de fajas.

También se producen coordenadas múltiples, geodésicas o planas, cuando se tienen distintos sistemas de referencia. Por ejemplo: es posible contar, para un mismo punto, con coordenadas Gauss-Krüger Campo Inchauspe 1969 y coordenadas planas Gauss-Krüger POSGAR 94.

### 9.4 Continuidades y discontinuidades

En los bordes de fajas se producen discontinuidades como consecuencia de tratarse de cilindros tangentes a diferentes meridianos. La conservación de archivos en una base de datos única se produce mediante la utilización de las coordenadas elipsóidicas.

### 9.5 U.T.M.

En el ámbito mundial Gauss-Krüger, tal como se la conoce en el país, es poco utilizada. La tendencia predominante es U.T.M. (proyección Mercator Transversa Universal) surgida a partir de la Segunda Guerra Mundial con el objeto de tener el menor número de bandas o fajas.

La proyección es, en su aspecto matemático, idéntica a la Gauss-Krüger y se diferencia en su modo de aplicación:

- utiliza el módulo 0.9996 para el meridiano central (en lugar de 1) convirtiéndola en secante,
- el ancho de las fajas, llamadas zonas, es de  $6^\circ$ ,
- el origen de las abscisas es un punto ubicado a 10 000 000 metros del Ecuador, para el hemisferio sur,
- la abscisa  $x$  se la llama  $N$  (northing) y a la ordenada  $y$  se la identifica como  $E$  (easting), lo cual es una solución apropiada dado que el criterio de elegir  $x$  e  $y$  no es uniforme.

En el país no se atendió la recomendación internacional (U.G.G.I, Bruselas, 1951) de adherir al uso de la proyección U.T.M. Sólo se trató como sugerencia durante el III Congreso Nacional de Cartografía (La Plata, 1958) y posteriormente el Instituto Geográfico Militar expuso las razones de mantener Gauss-Krüger a través de un meduloso análisis de Esteban Horvat.

La utilización de bandas de 6° no invalida lo expresado respecto de discontinuidades, que persisten - en otra medida - en UTM.

## **9.6 Otras proyecciones**

La mayor parte de los trabajos cartográficos del país están elaborados en Gauss-Krüger, sin embargo para ciertas aplicaciones se emplean otras proyecciones.

Gauss, en una única superficie de proyección para los mapas generales a escalas pequeñas (1:2500000; 1:5000000; etc.)

Mercator, en todas las cartas náuticas con un ecuador auxiliar ubicado la latitud media de la hoja representada.

Cónica Conforme de Lambert, con dos paralelos estándar para la cartografía aeronáutica, de acuerdo con las normas mundiales.

Algunas proyecciones equivalentes para la evaluación de fenómenos físicos como la meteorología o la cuantificación de recursos naturales o artificiales.

## **9.7 Cartografía regional y de áreas urbanas**

La cartografía a escalas grandes (1:5000; 1:1000; 1:500) que requieren los relevamientos de áreas urbanas con fines catastrales u otros no se compadece con la cartografía general de un país en escalas medias (1:100000; 1:50000) puesto que son distintos los intereses y porque en las primeras el factor de deformación lineal y su consecuencia sobre el cálculo de las superficies suele ser importante.

Al respecto cabe transcribir la parte pertinente de dos documentos elaborados por destacados expertos en la materia.

El primero redactado por Angus Hamilton y James Doig de la Universidad de New Brunswick (Canadá) como sugerencia para las provincias marítimas canadienses.

La cuestión principal con respecto a las proyecciones en las provincias marítimas es si la proyección Mercator Transversa Universal es adecuada para todos los fines o si son necesarios dos sistemas de proyección (la UTM y uno regional).

Está reconocido que para los fines exclusivamente cartográficos es adecuada la UTM y está también aceptado que para el almacenaje de la geocodificación y recuperación debería ser un sistema nacional aceptado.

Los requerimientos de un sistema de coordenadas para uso de ingeniería y levantamientos indican que la proyección UTM no es la adecuada y por lo tanto es necesario un segundo sistema.

El principal argumento sostenido por esta conclusión es que la mayoría considera deseable operar con dimensiones que puedan usarse directamente, sin correcciones apreciables.

La recomendación para los mapas a escala grande (hasta 1:20 000) es que la grilla local o regional sea la predominante y que la grilla UTM sea la secundaria.

El segundo texto corresponde a la introducción de "Cálculos de la Proyección Estereográfica" del ingeniero Esteban Horvat, publicado por la Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires en 1969.

Plantea Horvat el problema de representar con precisión una superficie en el plano en los centros urbanos y se responde diciendo que es evidente que los sistemas de proyección general de un país no satisfacen por sus grandes deformaciones lineales y de superficie.

Cita el caso del Gran Buenos Aires donde se encuentra la línea divisoria de dos sistemas y agrega que todos los inconvenientes pueden eliminarse casi por completo si a los grandes centros se aplica una proyección especial haciendo coincidir el origen con el centro del área urbana.

En casos como el presente resulta más apropiado elegir una proyección acimutal con origen en el centro de la zona a relevar. La estereográfica es una recomendación apropiada.

El caso más típico es la ciudad de Buenos Aires, que por tal motivo adoptó para su catastro - en 1991 - la Gauss-Krüger eligiendo como meridiano central, con un pequeño factor de escala, el que pasa por la Iglesia de Flores, que es aproximadamente la longitud media de la ciudad y que también puede adoptarse para el conurbano bonaerense.

## **9.8 Bibliografía del capítulo 9**

- Hamilton, Angus et. al. Report of the Task Force on Control Surveys in the Maritime Provinces. Fredericton, 1993.
- Horvat, Esteban. Cálculos en la Proyección Estereográfica, Dirección de Geodesia, M. O. P., La Plata, 1969.
- Horvat, Esteban. Proyección Gauss-Krüger en Coordenadas Reducidas (Cilindro Secante). I.PG.H. Revista Cartográfica Nro. 9. Buenos Aires, 1960.
- Mettler, Jacobo. Por Qué la Proyección Gauss-Krüger Conviene al Territorio Argentino. Primera Conferencia Argentina de Coordinación Cartográfica. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, Buenos Aires, 1936.
- Quiroga, Pedro. La Proyección Gauss-Krüger. Primera Conferencia Argentina de Coordinación Cartográfica. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, Buenos Aires, 1937.
- Richardus, Peter/Adler, Ron. Map Projections for Geodesist, Cartographers and Geographers. North Holland, Amsterdam, 1974.
- Rodríguez, Rubén C. Gauss-Krüger o UTM. Revista IGM 2-2. Buenos Aires, 1987.
- Rodríguez, Rubén C. Gauss-Krüger o UTM (apéndice). Revista IGM 3-4. Buenos Aires, 1988.
- Rodríguez, Rubén C. Las Coordenadas. V Jornadas Nacionales de Divulgación Catastral. Buenos Aires, 1993
- Subcomité de Geodesia, Comité Nacional de la U.G.G.I. Estándares Geodésicos, Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Buenos Aires, 1996.

## Tablas para Gauss - Krüger

Tabla 1 – Módulo de deformación

| LAT/DLONº | 0.5             | 1               | 1.5             | 2               | 2.5             | 3               |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 22        | 1.000033        | 1.000131        | 1.000295        | 1.000524        | 1.000818        | 1.001178        |
| 23        | 1.000032        | 1.000129        | 1.000290        | 1.000516        | 1.000807        | 1.001162        |
| 24        | 1.000032        | 1.000127        | 1.000286        | 1.000508        | 1.000794        | 1.001144        |
| 25        | 1.000031        | 1.000125        | 1.000281        | 1.000500        | 1.000782        | 1.001126        |
| 26        | 1.000031        | 1.000123        | 1.000277        | 1.000492        | 1.000769        | 1.001107        |
| 27        | 1.000030        | 1.000121        | 1.000272        | 1.000484        | 1.000756        | 1.001088        |
| 28        | 1.000030        | 1.000119        | 1.000267        | 1.000475        | 1.000742        | 1.001069        |
| 29        | 1.000029        | 1.000117        | 1.000262        | 1.000466        | 1.000728        | 1.001049        |
| 30        | 1.000029        | 1.000114        | 1.000257        | 1.000457        | 1.000714        | 1.001028        |
| 31        | 1.000028        | 1.000112        | 1.000252        | 1.000448        | 1.000699        | 1.001007        |
| 32        | 1.000027        | 1.000110        | 1.000246        | 1.000438        | 1.000685        | 1.000986        |
| 33        | 1.000027        | 1.000107        | 1.000241        | 1.000429        | 1.000670        | 1.000964        |
| 34        | 1.000026        | 1.000105        | 1.000236        | 1.000419        | 1.000654        | 1.000942        |
| 35        | 1.000026        | 1.000102        | 1.000230        | 1.000409        | 1.000639        | 1.000920        |
| 36        | 1.000025        | 1.000100        | 1.000224        | 1.000399        | 1.000623        | 1.000897        |
| 37        | 1.000024        | 1.000097        | 1.000219        | 1.000389        | 1.000607        | 1.000874        |
| <b>38</b> | <b>1.000024</b> | <b>1.000095</b> | <b>1.000213</b> | <b>1.000378</b> | <b>1.000591</b> | <b>1.000851</b> |
| 39        | 1.000023        | 1.000092        | 1.000207        | 1.000368        | 1.000575        | 1.000828        |
| 40        | 1.000022        | 1.000089        | 1.000201        | 1.000358        | 1.000559        | 1.000804        |
| 41        | 1.000022        | 1.000087        | 1.000195        | 1.000347        | 1.000542        | 1.000781        |
| 42        | 1.000021        | 1.000084        | 1.000189        | 1.000336        | 1.000526        | 1.000757        |
| 43        | 1.000020        | 1.000081        | 1.000183        | 1.000326        | 1.000509        | 1.000733        |
| 44        | 1.000020        | 1.000079        | 1.000177        | 1.000315        | 1.000493        | 1.000709        |
| 45        | 1.000019        | 1.000076        | 1.000171        | 1.000305        | 1.000476        | 1.000685        |
| 46        | 1.000018        | 1.000073        | 1.000165        | 1.000294        | 1.000459        | 1.000661        |
| 47        | 1.000018        | 1.000071        | 1.000159        | 1.000283        | 1.000443        | 1.000638        |
| 48        | 1.000017        | 1.000068        | 1.000153        | 1.000273        | 1.000426        | 1.000614        |
| 49        | 1.000016        | 1.000066        | 1.000148        | 1.000262        | 1.000410        | 1.000590        |
| 50        | 1.000016        | 1.000063        | 1.000142        | 1.000252        | 1.000393        | 1.000566        |
| 51        | 1.000015        | 1.000060        | 1.000136        | 1.000241        | 1.000377        | 1.000543        |
| 52        | 1.000014        | 1.000058        | 1.000130        | 1.000231        | 1.000361        | 1.000520        |
| 53        | 1.000014        | 1.000055        | 1.000124        | 1.000221        | 1.000345        | 1.000496        |
| 54        | 1.000013        | 1.000053        | 1.000118        | 1.000210        | 1.000329        | 1.000474        |

Tabla 2 – Convergencia plana de meridianos (en minutos de arco)

| LAT/DLON° | 0.5       | 1         | 1.5       | 2         | 2.5       | 3          |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 22        | 11        | 22        | 34        | 45        | 56        | 67         |
| 24        | 12        | 24        | 37        | 49        | 61        | 73         |
| 26        | 13        | 26        | 39        | 53        | 66        | 79         |
| 28        | 14        | 28        | 42        | 56        | 70        | 85         |
| 30        | 15        | 30        | 45        | 60        | 75        | 90         |
| 32        | 16        | 32        | 48        | 64        | 79        | 95         |
| 34        | 17        | 34        | 50        | 67        | 84        | 101        |
| 36        | 18        | 35        | 53        | 71        | 88        | 106        |
| <b>38</b> | <b>18</b> | <b>37</b> | <b>55</b> | <b>74</b> | <b>92</b> | <b>111</b> |
| 40        | 19        | 39        | 58        | 77        | 96        | 116        |
| 42        | 20        | 40        | 60        | 80        | 100       | 120        |
| 44        | 21        | 42        | 63        | 83        | 104       | 125        |
| 46        | 22        | 43        | 65        | 86        | 108       | 129        |
| 48        | 22        | 45        | 67        | 89        | 111       | 134        |
| 50        | 23        | 46        | 69        | 92        | 115       | 138        |
| 52        | 24        | 47        | 71        | 95        | 118       | 142        |
| 54        | 24        | 49        | 73        | 97        | 121       | 146        |

Tabla 3 – Reducción arco cuerda (en segundos de arco)

| Az°/Dist(km)      | 1    | 2    | 5    | 10   | 15   | 20   | 30    | 40    | 50    |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>y = 0 km</b>   |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| 0                 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 10                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1  | -0.2  | -0.4  |
| 20                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1 | -0.2  | -0.4  | -0.7  |
| 30                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1 | -0.3  | -0.6  | -0.9  |
| 40                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.2 | -0.4  | -0.7  | -1.0  |
| 50                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.2 | -0.4  | -0.7  | -1.0  |
| 60                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1 | -0.3  | -0.6  | -0.9  |
| 70                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1 | -0.2  | -0.4  | -0.7  |
| 80                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | -0.1 | -0.1  | -0.2  | -0.4  |
| 90                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| <b>y = 75 km</b>  |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| 0                 | -0.2 | -0.4 | -1.0 | -1.9 | -2.9 | -3.8 | -5.7  | -7.6  | -9.5  |
| 10                | -0.2 | -0.4 | -0.9 | -1.9 | -2.8 | -3.8 | -5.8  | -7.7  | -9.7  |
| 20                | -0.2 | -0.4 | -0.9 | -1.8 | -2.7 | -3.7 | -5.6  | -7.6  | -9.6  |
| 30                | -0.2 | -0.3 | -0.8 | -1.7 | -2.6 | -3.4 | -5.3  | -7.2  | -9.2  |
| 40                | -0.1 | -0.3 | -0.7 | -1.5 | -2.3 | -3.1 | -4.8  | -6.5  | -8.3  |
| 50                | -0.1 | -0.2 | -0.6 | -1.3 | -1.9 | -2.6 | -4.0  | -5.6  | -7.2  |
| 60                | -0.1 | -0.2 | -0.5 | -1.0 | -1.5 | -2.1 | -3.2  | -4.4  | -5.7  |
| 70                | -0.1 | -0.1 | -0.3 | -0.7 | -1.0 | -1.4 | -2.2  | -3.0  | -3.9  |
| 80                | 0.0  | -0.1 | -0.2 | -0.3 | -0.5 | -0.7 | -1.1  | -1.6  | -2.0  |
| 90                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| <b>y = 150 km</b> |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| 0                 | -0.4 | -0.8 | -1.9 | -3.8 | -5.7 | -7.6 | -11.4 | -15.2 | -19.1 |
| 10                | -0.4 | -0.8 | -1.9 | -3.8 | -5.7 | -7.6 | -11.4 | -15.2 | -19.1 |
| 20                | -0.4 | -0.7 | -1.8 | -3.6 | -5.4 | -7.3 | -11.0 | -14.8 | -18.6 |
| 30                | -0.3 | -0.7 | -1.7 | -3.3 | -5.0 | -6.7 | -10.2 | -13.8 | -17.4 |
| 40                | -0.3 | -0.6 | -1.5 | -3.0 | -4.5 | -6.0 | -9.1  | -12.3 | -15.6 |
| 50                | -0.2 | -0.5 | -1.2 | -2.5 | -3.8 | -5.1 | -7.7  | -10.5 | -13.3 |
| 60                | -0.2 | -0.4 | -1.0 | -1.9 | -2.9 | -4.0 | -6.0  | -8.2  | -10.4 |
| 70                | -0.1 | -0.3 | -0.7 | -1.3 | -2.0 | -2.7 | -4.2  | -5.6  | -7.2  |
| 80                | -0.1 | -0.1 | -0.3 | -0.7 | -1.0 | -1.4 | -2.1  | -2.9  | -3.7  |
| 90                | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |

## Capítulo 10

### LA TRANSICIÓN HACIA LOS NUEVOS SISTEMAS

---

#### 10.1 La situación

En la Argentina, como se ha manifestado en los capítulos precedentes, se ha utilizado como sistema de referencia Campo Inchauspe en sus dos versiones - 1954 y 1969 - y otros como sistemas locales o regionales. Todos ellos por su concepción y ejecución siguieron las reglas de los levantamientos geodésicos convencionales (triangulación y poligonación) que establecían:

- un punto datum, cuyas coordenadas planimétricas provenían de una observación astronómica (internamente muy precisa, pero incompatible con el resto del mundo) y
- un elipsoide de referencia asociado, tangente al geoide en dicho punto (ondulación igual a cero).

La precisión de estas redes alcanzaban como precisión máxima  $1/300000$  y al momento de realizar vinculaciones con las redes de los países limítrofes debían realizarse trabajos geodésicos de campo similares a los que determinaban las mismas redes pero con la carga adicional, nada despreciable, de los trámites burocráticos para ejecutarlos en áreas fronterizas. El esfuerzo regional más importante llevado a cabo en la América del Sur fue el Datum Sudamericano de 1969 que ofreció una solución interesante para resolver muchos problemas continentales, pero que no surtió efecto porque los países involucrados no lo aceptaron abiertamente para sus redes nacionales. Indagar cuáles fueron las razones permite imaginar un rechazo al cambio, la redefinición de sus redes (que constituía una tarea nada fácil), tal vez un principio de nacionalismo extremo o la escasa demanda de coordenadas precisas y únicas por parte de los usuarios.

La situación hoy es totalmente distinta. La tecnología disponible para llevar a cabo el posicionamiento es sencilla, precisa y económica. En el capítulo 5 se justifica la necesidad de un sistema único y compatible con la tecnología GPS. Estos elementos motivaron al Instituto Geográfico Militar para la adopción de POSGAR 94 como marco de referencia único y geocéntrico, que materializa en el país el sistema mundial WGS 84.

Respecto de la precisión, esta nueva red es significativamente mejor que la anterior. Una estimación la indica como  $1/1000000$ , es decir entre unas 3 veces mejor o aún más que la anterior. En tales casos sería un despropósito someter a Inchauspe 69 redes GPS, mucho más precisas, por la degradación que le produciría a éstas.

En la región - América del Sur - también se siguió una política similar de la cual surgió SIRGAS 95 que va más allá y materializa el marco de referencia mundial disponible más preciso: ITRF. Los países del continente están prontos a adoptarlo y referir sus redes a este marco superior.

En el caso particular de la Argentina, el reproceso de la red POSGAR ya se ha iniciado y dará lugar a un nuevo POSGAR, no muy diferente del anterior, lo que no preocupará a la mayoría de los usuarios que podrán continuar en POSGAR 94. Sin embargo es preciso señalar que cuando se utilizan sistemas tan precisos (coordenadas de puntos lejanos con precisiones centimétricas o mejores) será necesario tener en cuenta - en el futuro - la deriva de los continentes que se expresa como velocidad del sistema.

## 10.2 Posibles inconvenientes y su solución

Teóricamente lo expuesto parece justificar el cambio, sin embargo quedan pendientes muchas lógicas inquietudes de los usuarios, algunas de las cuales mencionaremos procurando dar una solución.

El sistema Campo Inchauspe tiene en el país monumentados 18000 puntos y está relativamente cerca de los objetos de interés de agrimensores (parcelas rurales, obras de infraestructura, etc.) a los que podrían vincularse lo cual sería cierto si determinamos la distancia en kilómetros en línea directa, pero no es tal si consideramos su accesibilidad. En áreas montañosas los mojones están en la cumbre de los cerros más elevados, en la pampa húmeda en el medio de los campos con accesos no siempre fáciles a los mismos o muchos de ellos (particularmente los de 4to. orden) materializados por molinos de viento o torres de iglesias. Su ubicación respondió a la necesidad de formar figuras regulares (triángulos equiláteros) respetando la conocida regla de la fuerza de las figuras.

Es poco probable que alguien se interese por instalar un receptor GPS en la cumbre de un cerro o sobre la torre de un molino para realizar una observación breve sin la necesidad de intervisibilidad con los puntos circundantes.

En la actualidad los puntos están a la vera de los caminos principales y trasladar las coordenadas a la zona de interés, por ejemplo a 100 km, puede demorar sólo horas. De todos modos esa cifra de 100 km en menos de un año será excesiva puesto que varias provincias argentinas han densificados la red POSGAR (Buenos Aires, Santa Fe, Río Negro, Tierra del Fuego, Neuquén, Chubut), otras ya cuentan con las redes del Proyecto PASMA I (Mendoza, San Luis, La Rioja, Salta, San Juan, Catamarca) y el resto estarán en el PASMA II a punto de comenzar o ya lo habrán logrado a través de los proyectos catastrales (Provincias I y Provincias II).

Es más, las redes de densificación recientemente desarrolladas muchas veces emplazaron sus puntos sobre los mojones de la Red Nacional de Nivelación con lo que se cumple el doble propósito de obtener simultáneamente coordenadas planimétricas y altimétricas, que por otra parte es el logro de la tecnología satelital.

Se menciona, asimismo, la disponibilidad de cartografía existente referida a Campo Inchauspe 1969 y no se justifica la edición de una nueva cartografía por el sólo hecho del cambio de sistema de referencia. En el caso de que la cartografía sea más reciente o exprese la imagen actual del terreno, sólo será necesario indicar el nuevo marco de referencia y aplicar los parámetros de transformación disponibles y el *software* necesario para llevar a cabo el proceso. En muchos casos la cartografía disponible requiere de un proceso de actualización y está plenamente justificado que se le asignen al Instituto Geográfico Militar los recursos necesarios para ello.

También en este sentido el IGM y algunas provincias argentinas están editando cartas de líneas o de imagen en POSGAR 94.

Quedaría por analizar el rol del uso futuro de los teodolitos y los electrodistanciómetros o de las estaciones totales, que para el caso la situación es idéntica, y su integración con el posicionamiento satelital. Dos puntos GPS para arranque y orientación, implantados por las entidades oficiales del ramo (por ejemplo oficinas de catastro) o bien por parte de profesionales o empresas del ámbito privado que dispongan del equipamiento necesario, sería una solución adecuada.

Es necesario, en todos los casos, evaluar el proyecto y aplicar la tecnología disponible más adecuada pudiéndose presentar la alternativa del GPS como la situación típica y en combinación con las estaciones totales para zonas densamente arboladas, para áreas urbanas con edificios de mucha altura (desfiladeros ciudadanos) y algunas otras circunstancias.

### **10.3 Algunos casos probables**

#### **10.3.1 Cambio de sistema para la cartografía escala 1:25000 y menores**

Un cambio de la posición de los esquineros de la hoja puede alcanzar en el terreno un valor máximo de 100 metros en latitud y otro tanto en longitud, que para la escala citada está representado por 4 mm, y se reduce para las otras escalas cartográficas usuales.

#### **10.3.2 Necesidad de coordenadas POSGAR 94**

Cuando se requieren coordenadas en el sistema nacional vigente y no se dispone de un punto de tales características a una distancia conveniente, puede optarse por utilizar como partida un vértice de la red Campo Inchauspe 1969 mediante la transformación de sus coordenadas. Esta modalidad satisface muchos casos donde la precisión interna es crítica, pero toleran una indeterminación - como la que proporcionan los parámetros de transformación - para el posicionamiento absoluto. También es válido para los proyectos de georreferenciación que emplean los sistemas de información geográfica. La excepción sería cuando se trate de representaciones a escalas muy grandes.

#### **10.3.3 Operación en Campo Inchauspe mediante GPS**

Si bien el procedimiento no es rigurosamente correcto, puede emplearse transformando las coordenadas Inchauspe de los puntos pertinentes a POSGAR 94, realizar el cálculo con el *software* adecuado y finalizar mediante la transformación de retorno a Inchauspe. Dado que los parámetros son iguales - pero de signos opuestos - no introducen ninguna alteración en los resultados.

#### **10.3.4 Transformación POSGAR 94 a POSGAR 98**

Los desplazamientos estimados serán, en general, menores de 1 metro con la ventaja de que se trata de dos sistemas concéntricos o muy próximos a ello y con un elipsoide prácticamente idéntico, por lo que las diferencias en coordenadas curvilíneas y planas serán casi idénticas.

## ANEXO

## Grupo de Trabajo III – SIRGAS

## I. Tipos de alturas

La altura de un punto sobre la superficie terrestre es la distancia existente, sobre la línea vertical, entre éste y una superficie de referencia (dátum vertical). Su determinación se realiza mediante un procedimiento conocido como nivelación, el cual, a su vez, puede ser barométrico, trigonométrico, geométrico o espacial. Sin embargo, debido a la influencia del campo de gravedad terrestre en el proceso de medición, los resultados obtenidos deben ser cualificados involucrando correcciones gravimétricas.

En el proceso convencional de determinación de alturas, el telescopio del instrumento es tangente a la superficie equipotencial local y la línea de la plomada coincide con el vector de la fuerza de gravedad, el cual es perpendicular a aquellas superficies. De aquí, las diferencias de nivel calculadas no solo reflejan las variaciones topográficas del terreno, sino que además consideran las alteraciones gravitacionales de la Tierra. La desviación que estas alteraciones generan sobre las alturas medidas pueden ser cuantificadas y tratadas de acuerdo con los conceptos físicos considerados en su procesamiento. Así, las alturas utilizadas en Geodesia se clasifican según su determinación, su aplicación y el modelo matemático o físico considerado en su definición. Dentro de este marco, se distinguen alturas de tipo geométrico (niveladas y elipsoidales) y alturas de tipo físico (dinámicas, normales y ortométricas).

## 1. Alturas de tipo geométrico

## 1.1 Alturas niveladas

Son las obtenidas bajo el proceso de nivelación geométrica con métodos ópticos de medición (Figura 1). Las diferencias de nivel observadas varían de acuerdo con el campo de gravedad inherente al sitio en consideración.

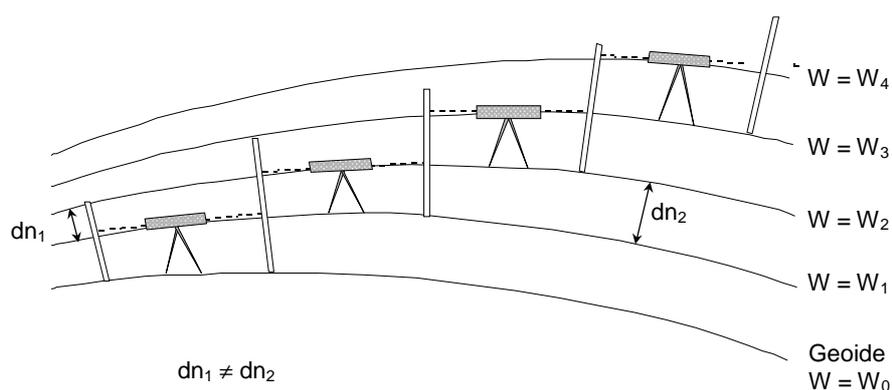


Figura 1. Alturas niveladas

Las cantidades observadas ( $dn$ ) corresponden con la distancia existente entre las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre y su sumatoria permite conocer la diferencia de altura entre los puntos de interés. No obstante, debido a la forma elipsoidal de la Tierra y a la distribución irregular de sus masas internas, las superficies equipotenciales no son equidistantes; los valores de desnivel entre éstas, varían de acuerdo con el trayecto de medición.

Como estas alturas dependen del camino descrito en el proceso de nivelación, fácilmente pueden obtenerse diferentes valores de altura para un mismo punto, haciendo que sean utilizadas en áreas pequeñas que no requieren considerar ni la figura elipsoidal de la Tierra ni las variaciones de su campo de gravedad. Su aplicación práctica es efectiva solo en redes locales con, aproximadamente, 10 km de extensión.

## 1.2 Alturas elipsoidales

Las alturas elipsoidales ( $h$ ) representan la separación entre la superficie topográfica terrestre y el elipsoide. Dicha separación se calcula sobre la línea perpendicular a este último. (Figura 2).

Las alturas elipsoidales son obtenidas a partir de las coordenadas geocéntricas cartesianas ( $X, Y, Z$ ) definidas sobre un elipsoide de referencia (p. ej. el modelo Geodetic Reference System 1980, GRS80, o el World Geodetic System 1984, WGS84, los cuales, en la práctica, son iguales), y determinadas a partir del posicionamiento satelitario de los puntos de interés.

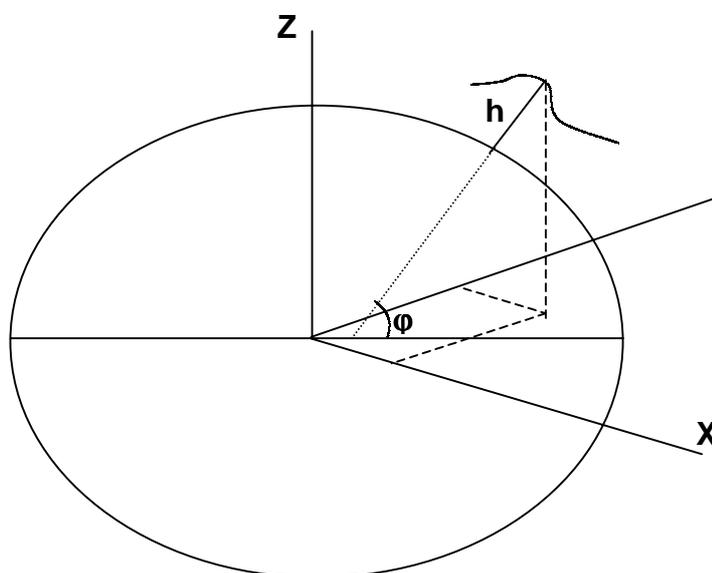


Figura 2. Alturas elipsoidales

Debido a la utilización masiva de la técnica GPS, es indispensable considerar este tipo de alturas en los registros oficiales de las cantidades directamente medidas. Sin embargo, como éstas no consideran el campo de gravedad terrestre en su determinación, pueden presentar valores iguales en puntos con niveles diferentes, o viceversa, haciendo que su aplicación en la práctica sea mínima. Tal circunstancia exige que éstas sean complementadas con otro tipo que sí considere el campo de gravedad terrestre.

## 2. Alturas de tipo físico

Una manera de determinar las distancias reales entre las superficies de nivel es cuantificando sus diferencias de potencial, las cuales al ser sumadas en un circuito cerrado siempre serán cero y los resultados obtenidos, por diferentes trayectorias, serán iguales. Esto debido a que los valores de potencial son unívocos y dependen solamente de la posición. En la práctica, estas diferencias corresponden con los resultados de las nivelaciones clásicas combinadas con los valores de gravedad registrados en la zona de interés. La diferencia de potencial entre cada punto de cálculo y el geoide (principal superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre) se conoce como número geopotencial:

$$\int_0^A g \, dn = W_0 - W_A = C \quad (1)$$

Siendo  $g$  la gravedad observada en el punto de cálculo,  $dn$  diferencial en altura,  $W_0$  el potencial sobre el geoide y  $W_A$  el potencial sobre la superficie que pasa por el punto de cálculo. La dimensión de los números geopotenciales es  $[m^2/s^2]$ , la cual no representa una longitud, haciendo que su utilización en la práctica no sea conveniente. Estos números pueden ser expresados en unidades de distancia al ser divididos por algún valor convencional de gravedad:

$$\text{altura } (H) = \frac{\text{número geopotencial } (C)}{\text{valor de gravedad } (G)} \quad (2)$$

La clase de altura ( $H$ ) obtenida al resolver la expresión 2, dependerá del tipo de gravedad ( $G$ ) incluida. Si  $G$  corresponde con el valor medio de gravedad teórica (normal) entre la estación y la superficie de referencia, la altura calculada será normal. Mientras que, si  $G$  equivale a un valor constante de gravedad teórica para un punto arbitrario,  $H$  es conocida como altura dinámica. Finalmente, si  $G$  es igual al valor medio de gravedad real entre el geoide y la estación evaluada, la altura estimada es llamada ortométrica.

### 2.1 Alturas dinámicas

Las alturas dinámicas se calculan al dividir los números geopotenciales por un valor constante de gravedad ( $\gamma_{cte}$ ):

$$H_{(din)} = \frac{C}{\gamma_{cte}} \quad (3)$$

La ventaja de las alturas dinámicas radica en que, valores iguales de éstas representan una superficie equipotencial del campo de gravedad, es decir; una superficie de agua en calma en cualquier elevación sobre el geoide tiene siempre la misma altura dinámica. Estas alturas se obtienen a partir de las niveladas, mediante la aplicación de correcciones que expresan los incrementos o decrementos, en altura, generados por involucrar un valor constante de gravedad.

La principal desventaja de este tipo de alturas está en que, por causa de la convergencia de las superficies equipotenciales (especialmente en dirección norte-sur, figura 1) la distancia geométrica entre ellas varía ostensiblemente ( $5 \times 10^{-3}$  unidades del ecuador a los polos), sin

alterarse su altura dinámica. Por ejemplo, si se consideran dos superficies equipotenciales, cuya distancia geométrica es de 100 m en el ecuador, su equivalencia en los polos será de 99,5 m, mientras que, su altura dinámica siempre será constante.

## 2.2 Alturas normales

En las alturas normales los números geopotenciales no son divididos por un valor constante de gravedad (como en la ecuación 3) sino, por el valor medio de la gravedad normal entre la superficie de referencia (denominada cuasi-geoide) y el punto en consideración ( $\gamma'$ ) (Figura 3):

$$H_{(norm)} = \frac{C}{\gamma'} \quad (4)$$

$\gamma'$  se obtiene a partir de la fórmula de la gravedad normal terrestre, la cual está sólo en función de la latitud geográfica del punto y es generada para el elipsoide de referencia utilizado.

Las correcciones normales que se aplican a las alturas niveladas son más pequeñas que las de las alturas dinámicas, ya que  $\gamma'$  considera la convergencia de las superficies equipotenciales.

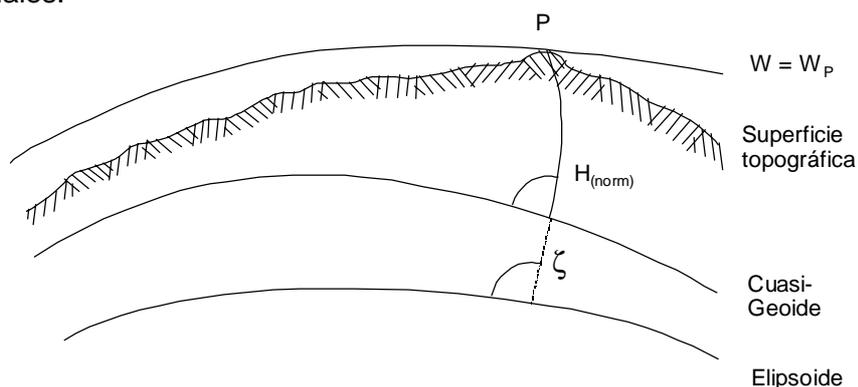


Figura 3. Alturas normales

De acuerdo con lo expuesto, estas alturas pueden obtenerse a partir de las elipsoidales si se les descuenta la ondulación del cuasi-geoide, la cual es conocida como anomalía de altura o altura anómala ( $\zeta$ ):

$$H_{(norm)} = h - \zeta \quad (5)$$

$\zeta$  se obtiene a partir de los cálculos geoidales realizados por métodos gravimétricos o satelitales.

## 2.3 Alturas ortométricas

El cálculo de las alturas ortométricas es similar al de las normales, sólo que los números geopotenciales son divididos por el valor medio de la gravedad verdadera ( $g'$ ) entre el punto evaluado y el geoide. (Figura 4).

$$H_{(ortom)} = \frac{C}{g'} \quad (6)$$

El inconveniente que presentan estas alturas se basa en que no es posible conocer el valor de  $g'$ . Normalmente, la gravedad real es medida sobre la superficie topográfica y continuarla, hacia abajo, a lo largo de la línea de la plomada, requiere de la formulación de modelos sobre la distribución de densidad de las masas terrestres. De esta manera, los valores de altura ortométrica calculados dependen de las hipótesis utilizadas en el modelamiento de la densidad. Los métodos más comunes en la determinación de alturas ortométricas corresponden con las hipótesis de Helmert, Vignal, Baranov y Aire Libre (Free Air).

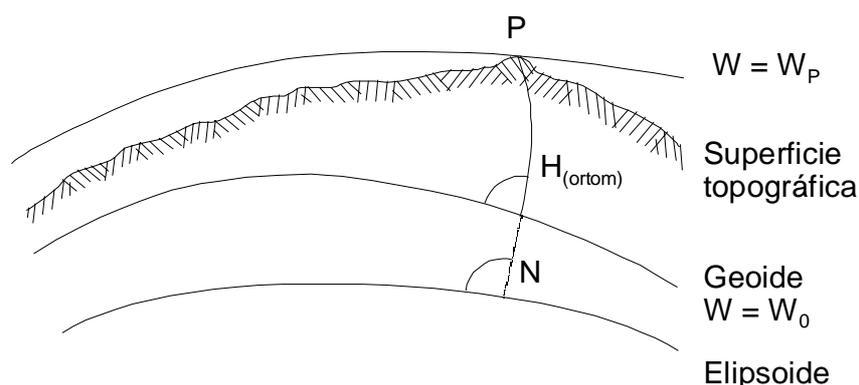


Figura 4. Alturas ortométricas

Las correcciones ortométricas aplicadas a las alturas niveladas están en el mismo orden que las utilizadas para la obtención de las normales. Sin embargo, la diferencia entre alturas ortométricas y normales (y con esto entre el geoide y el cuasi-geoide) depende de la discrepancia entre la gravedad verdadera modelada a través de alguna hipótesis y la gravedad normal, pudiéndose alcanzar valores de decímetros en estas diferencias.

Las alturas ortométricas pueden obtenerse a partir de las elipsoidales mediante la sustracción de las ondulaciones geoidales  $N$ :

$$H_{(ortom)} = h - N \quad (7)$$

Tanto en la determinación de  $N$ , como en el cálculo de  $g'$  (ecuación 6) y en la estimación de las correcciones ortométricas, se requiere de una hipótesis sobre la distribución de densidades de las masas terrestres, lo cual; a pesar de ser la misma en los tres cálculos, no garantiza la obtención de un conjunto homogéneo de alturas ortométricas y dificulta su combinación con las alturas obtenidas a partir de las elipsoidales.