

Manual de Marcos de Referencia en la Práctica



Comisión 5 Grupo de trabajo 5.2 Sistemas de referencia

Agosto 2017

Manual de Marcos de Referencia en la Práctica

Comisión 5 Grupo de trabajo 5.2 Sistemas de referencia

Editor: Graeme Blick

FEDERACIÓN INTERNACIONAL DE GEÓMETRAS (FIG)

Este manual técnico lo produce la Comisión 5 de la FIG y contribuyen en él un conjunto de expertos técnicos, con el objetivo de proporcionar una breve introducción a la utilización de marcos de referencia en la práctica en una serie de artículos cortos fácilmente ampliables y actualizables.

Cualquier comentario o sugerencia sobre el contenido debe enviarse al presidente de la Comisión 5 de la FIG: ver <http://www.fig.net/commission5/>

Derechos de autor © Federación Internacional de Geómetras (FIG), junio de 2014

Todos los derechos reservados.

Federación Internacional de Geómetras (FIG)

Kalvebod Brygge 31–33

DK-1780 Copenhagen V

DINAMARCA

Tel. + 45 38 86 10 81

Correo: FIG@FIG.net

www.fig.net

Publicado originalmente en inglés en 2014 (ISBN 978-87-92853-25-7)

Traducción al español por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI) revisada por el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de España

Agradecimientos especiales a la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

ISSN 2311-8423 (pdf)

ISBN 978-87-92853-63-9 (pdf)

Publicado por

Federación Internacional de Geómetras (FIG)

Editor: Graeme Blick

Autores: Graeme Blick, Chris Crook, Nic Donnelly, Roger Fraser, Mikael Lilje, David Martin, Chris Rizos, Daniel R. Roman, Rob Sarib, Tomás Soler, Richard Stanaway, y Neil D. Weston

Fotografía de la portada: © Land Information New Zealand;

Fotografía de contraportada: © Henry Murwa, Digmaap Consultants, Kenia

Diseño: Lagarto

CONTENIDO

PREFACIO	5
1 INTRODUCCIÓN	7
Antecedentes	7
Datum y proyecciones	8
Revisiones de este manual	10
2 GEODESIA Y MARCOS DE REFERENCIA GLOBALES	11
Geodesia moderna y el ITRS/ITRF	11
Estaciones ITRF.....	12
Sistema de Observación Geodésico Mundial	13
Más información.....	14
3 SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRES GLOBALES	15
Introducción	15
Relaciones entre marcos de referencia globales	15
Transformación general entre coordenadas X_1 y X_2	16
Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF)	16
Las técnicas geodésicas que contribuyen al ITRF.....	17
Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)	17
Más información.....	18
4 MARCOS DE REFERENCIA NACIONALES Y REGIONALES	19
Marcos de referencia globales.....	19
Marcos de referencia regionales.....	19
Marcos de referencia nacionales	19
Tipos de datums geodésicos	20
Modelos de deformación	21
5 SISTEMAS DE ALTURA	23
La relación entre la gravedad y el Sistema Mundial de Altura (WHS)	23
Cómo las mediciones GNSS están vinculadas a alturas ortométricas locales	23
Las relaciones entre los diversos aspectos del campo de gravedad de la Tierra	24
Cómo se determinan los modelos de geoide y se utilizan como datum vertical.....	25
Más información.....	25
6 TRANSFORMACIÓN ENTRE DATUMS	27
Introducción	27
Transformaciones de similitud.....	28
Otros métodos de transformación	29
7 TRANSFORMACIÓN ENTRE DATUMS DE MARCOS DE REFERENCIA NO ESTÁTICOS.	31
Introducción	31
Casos de uso	31
Ejemplo general	31
Ejemplo.....	31

8	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL MARCO DE REFERENCIA MEDIANTE LA TÉCNICA DE MÍNIMOS CUADRADOS	35
	Introducción	35
	Definición y propagación del marco de referencia	35
	El modelo matemático: el vínculo vital entre observaciones geodésicas y los parámetros del marco de referencia	36
	Estimación y ajuste	37
	Referencias	38
9	MEDIDAS DE EVALUACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR MÍNIMOS CUADRADOS	39
	Introducción	39
	Análisis y prueba de resultados	39
	Fiabilidad de una red geodésica	40
	Un procedimiento de estimación general y evaluación	41
	Referencias	41
10	SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE	43
	Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)	43
	CORS y modos de posicionamiento	44
	Multi-GNSS	45
	Más información	46
11	REDES GNSS CORS Y LA VINCULACIÓN AL ITRF	47
	Cómo vincular una CORS al ITRF	47
	Servicios GNSS de procesamiento en línea	48
	Más información	49
12	EL SERVICIO INTERNACIONAL DE LOS GNSS (IGS)	51
	Introducción	51
	Formación	51
	Estructura	52
	Datos y productos	52
	La alineación con el ITRF	53
	Más información	53
13-1	ESTÁNDARES Y CALIDAD DE LOS MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRE	55
	Calidad y estándares	55
	Trazabilidad, calibración y verificación	56
	ISO 17123 Parte 8: Sistemas de medición GNSS en campo con cinemática en tiempo real (RTK)	58
13-2	ESTÁNDARES Y CALIDAD DE MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRE	59
	Ejemplo	59
	Más información	60
	SOBRE LOS AUTORES	61

PREFACIO

La Comisión 5 de la Federación Internacional de Geómetras (FIG) es responsable de auxiliar a los topógrafos practicantes de las asociaciones miembros de la FIG en la aplicación de tecnologías de medición y posicionamiento con eficiencia y eficacia en sus actividades cotidianas de topografía. Una de las tecnologías más importantes surgidas en las últimas décadas han sido los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). El auge de esta tecnología global ha puesto de manifiesto la necesidad de que los países cambien de datum geodésico definido localmente a un datum más global basado en el marco de referencia terrestre internacional. Esta publicación de FIG es una respuesta de la Comisión 5 a esta tendencia, en la que se reúnen una serie de artículos técnicos con los que informar mejor a los topógrafos en cuestiones clave mientras realinean y actualizan su base de conocimientos profesional.

Durante mi tiempo en la Comisión 5 como presidente de grupo de trabajo y luego como presidente de comisión, hemos puesto especial énfasis en la mejora de la disponibilidad de información técnica y accesible sobre los marcos de referencia, especialmente para los topógrafos y autoridades encargadas de la toma de decisiones en los países en desarrollo. Ese trabajo lo ampliaron y mejoraron los presidentes sucesores de la Comisión 5, Rudolf Staiger y Mikael Lilje. Destacó especialmente en el trabajo de la Comisión en los últimos años una serie de talleres sobre marcos de referencia, conectados a la FIG y a eventos aliados en países en desarrollo.

La FIG desea reconocer la colaboración, a través de nuestro memorando de entendimiento, de la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre, que financió la visita de los delegados de países en desarrollo a varios talleres internacionales que forman la base de esta publicación. Esa interacción fue muy importante en la identificación de los temas específicos que debían cubrirse para ayudar a los topógrafos a entender mejor.

Un aspecto muy importante de esta publicación es una demostración concreta del valor del aumento de la cooperación en los últimos años entre la FIG y su asociación hermana, la Asociación Internacional de Geodesia (AIG). Los talleres internacionales y fichas técnicas resultantes han generado una colaboración muy estrecha entre expertos internacionalmente reconocidos de la FIG y de la AIG, y se espera que dicha colaboración siga creciendo y profundizándose en el futuro. La FIG desea reconocer especialmente el papel desempeñado por el presidente de la AIG, Chris Rizos, como fuerza impulsora del compromiso de la AIG hacia una mayor cooperación.

Finalmente, la FIG y sus asociaciones miembros están muy agradecidas con los expertos de ambas, FIG y AIG, que generosamente donaron su tiempo y esfuerzo para apoyar los talleres internacionales, y especialmente a aquellos que participaron en esta importante publicación. Agradecemos especialmente al vicepresidente de la Comisión 5, Graeme Blick, que coordinó el desarrollo de esta publicación bajo el liderazgo del presidente de la Comisión, Mikael Lilje, con la hábil administración de la Comisión del vicepresidente Rob Sarib.

Matt Higgins

Ex-presidente de la Comisión 5 y vicepresidente de la FIG
Miembro honorario de la FIG

1 INTRODUCCIÓN

Graeme Blick

Información del territorio de Nueva Zelanda, Nueva Zelanda
gblick@linz.govt.nz

Este manual aborda aspectos técnicos relacionados con marcos de referencia, presenta fórmulas cuando corresponde y está dispuesto como una serie de fichas técnicas breves que pueden actualizarse fácilmente. El objetivo del manual es proporcionar una breve introducción al uso de marcos de referencia en la práctica. Está dirigido a topógrafos pero presupone algún conocimiento del tema. Contiene una serie de términos técnicos que podrían no aparecer detallados, así como referencias bibliográficas donde puede encontrarse información adicional.

Antecedentes

Desde los albores de la civilización, la gente ha identificado la necesidad de medir y expresar en un mapa sus dominios (Fig. 1). Al principio, esta preocupación se limitó a las inmediaciones de su casa; más tarde se amplió a la distancia de los mercados; y finalmente, con el desarrollo de los medios de transporte y la comunicación, se amplió su interés al mundo entero.



Figura 1: Mapa antiguo del Pacífico suroeste.

Gran parte de este temprano “interés mundial” se caracterizó por la especulación en cuanto al tamaño, la forma y la composición de la Tierra.

La Geodesia es la ciencia de medir la forma y el tamaño de la Tierra y la ubicación precisa de puntos en su superficie. A medida que nuestra sociedad y la economía cada vez son más dependientes de tecnologías complejas y de la gestión del espacio en el que vivimos, se ha intensificado la necesidad de posicionamiento preciso y consistente y de datos espaciales fiables.

A medida que avanzamos hacia un mundo donde las nuevas tecnologías nos permiten determinar rápidamente la posición exacta de puntos y rasgos, estamos desarrollando el concepto de todo lo “geodésico”, es decir, el desarrollo de un catastro geodésico sin fisuras y todos los conjuntos de datos espaciales en términos de un sistema geodésico común.

Para muchos países sujetos a efectos de movimientos terrestres debido a eventos como terremotos, actividad volcánica o de placas tectónicas, la capacidad de inspeccionar y registrar esos movimientos para mantener la precisión del sistema geodésico es una tarea importante. El sistema geodésico de un país proporciona la red permanente de puntos de referencia y los datos asociados de posición que le permitan asegurar que todos los datos relativos a territorio, recursos y ubicación se administren de forma sistemática y ordenada.

Fundamental para cualquier sistema geodésico es el marco de referencia espacial sobre el cual se basa. Históricamente fueron locales o regionales, pero a medida que hemos transitado al uso de sistemas de posicionamiento por satélite, nuestros marcos de referencia han pasado a ser de una naturaleza más global.

Un marco de referencia espacial permite que una ubicación se identifique sin ambigüedad a través de un conjunto de coordenadas (latitud y longitud, por lo general, o norte y este).

Datum y proyecciones

Un **datum geodésico** es una superficie de referencia curvada que se utiliza para expresar las posiciones de elementos de forma coherente. Los datums geodésicos se suelen clasificar en dos categorías: local y geocéntrico.

Un **datum geodésico local** es un datum que se aproxima al tamaño y forma de la Tierra en una parte determinada de la superficie del nivel del mar (Figura 2). Se define mediante la especificación de un elipsoide de referencia, la posición (latitud y longitud) de una estación inicial y un azimut de esa estación. Invariablemente, el centro de su elipsoide no coincidirá con el centro de masa de la Tierra. Hasta hace muy poco, la mayoría de los sistemas geodésicos nacionales se basaron en datums geodésicos locales.

Un **datum geocéntrico** es un datum que mejor se aproxima al tamaño y la forma de la Tierra en su conjunto. El centro de su elipsoide coincide con el centro de masa de la Tierra (Figura 3). Los datums geocéntricos no pretenden ser una buena aproximación de solo una parte de la Tierra, pero en promedio son un buen ajuste.

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) utilizan datums geocéntricos para expresar sus posiciones debido a su alcance global. Varios GNSS ahora son

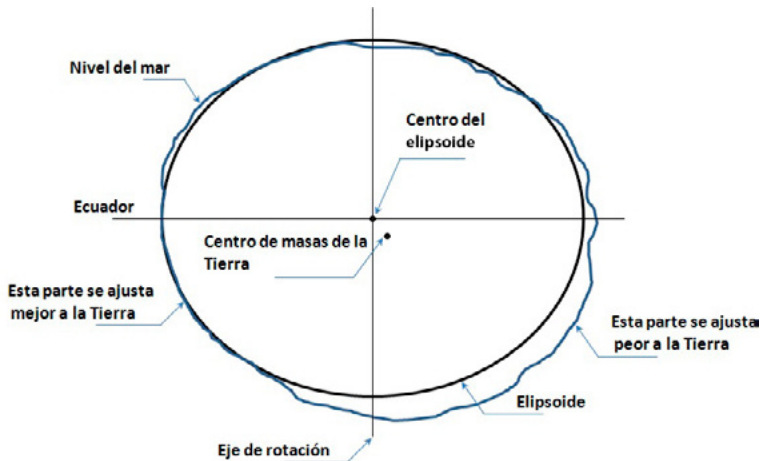


Figura 2: Datum local con un elipsoide de mejor ajuste.

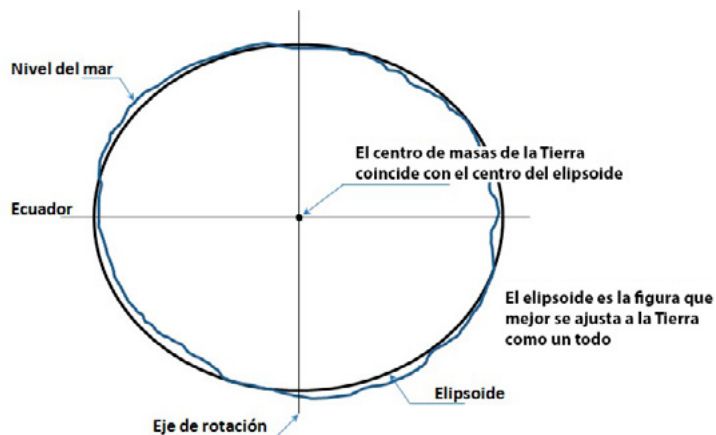


Figura 3: Datum geocéntrico con un elipsoide de mejor ajuste al mundo.

plenamente operativos o se encuentran en desarrollo, como GPS, GLONASS, Galileo y BEIDOU, y cada uno utiliza un datum geocéntrico ligeramente diferente.

El Sistema Geodésico Mundial 1984 (utilizado por GPS) es un ejemplo de un datum geocéntrico.

El nivel medio del mar se utiliza ampliamente como la **superficie de referencia para la medición de la altura**. Los contornos de un mapa muestran habitualmente la altura sobre el nivel medio del mar. Sin embargo, las alturas en términos de un datum geodésico se refieren al elipsoide.

Se proporciona otro tipo de sistema de coordenadas en forma de **proyecciones cartográficas**. Una proyección cartográfica permite que la superficie curva del elipsoide sea representada en una hoja plana de papel (en otras palabras, un mapa). Las proyecciones se utilizan para definir sistemas locales de coordenadas en los cuales los cálculos de distancia, dirección y área son menos complejos que los cálculos equivalentes sobre el elipsoide.

Muchas proyecciones pueden definirse en términos de un datum geodésico particular, pero cada proyección solo puede estar vinculada a un único datum geodésico.

El proceso de proyección resulta en la distorsión de la representación espacial del mapa. Imaginemos el estiramiento y rotura que tendría que hacer para que la superficie curva de una pelota de baloncesto permaneciera plana en el suelo. La magnitud de la distorsión puede calcularse, con lo que pueden efectuarse correcciones cuando sea necesario.

Se asocia un sistema de rejilla rectangular de coordenadas (similar a nuestra rejilla de "Tierra plana") con cada proyección cartográfica. Las coordenadas de la proyección cartográfica se describen en términos de Norte y Este, que son distancias al Norte y Este de un origen. Por lo general se expresan en unidades de metros.

Hay un gran número de diferentes tipos de proyecciones cartográficas, y cada una representa una forma diferente de la distorsión de la superficie del elipsoide en un plano. Una de las más utilizadas es la proyección transversa de Mercator.

Revisiones de este manual

Este manual lo ha producido la Comisión 5 de la FIG. Se espera que se revise y actualice a intervalos regulares.

Cualquier comentario sobre el contenido debe enviarse al presidente de la Comisión 5 de la FIG: ver <http://www.fig.net/commission5/>

2 GEODESIA Y MARCOS DE REFERENCIA GLOBALES

Chris Rizos

Universidad de Nueva Gales del Sur, Australia

c.rizos@unsw.edu.au

Los topógrafos utilizan cada vez más los sistemas de posicionamiento por satélite que proporcionan posición en términos de marcos de referencia globales. Se está volviendo cada vez más importante para los topógrafos entender estos marcos de referencia y cómo se relacionan con los sistemas de referencia locales. Esta sección brinda una visión general de la ciencia de la geodesia y el uso de marcos de referencia globales.

Geodesia moderna y el ITRS/ITRF

La misión principal de la Geodesia moderna es la definición y mantenimiento de marcos de referencia y modelos geométricos y gravimétricos precisos, así como la generación de técnicas de posicionamiento de alta exactitud para los usuarios con el fin de conectarse a estos marcos.

La Asociación Internacional de Geodesia (AIG) ha establecido servicios para todas las principales técnicas de geodesia satelital: Servicio Internacional (IGS) de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS); Servicio Internacional de Medición Láser (ILRS); Servicio Internacional de Interferometría de Línea Base Muy Larga (IVS); Servicio Internacional de Orbitografía Doppler y Radioposicionamiento Integrado por Satélite (IDS); Servicio Internacional del Campo de Gravedad (IGF); y otros. Estos servicios generan una amplia gama de productos con órbitas satelitales precisas, coordenadas de estaciones y parámetros de orientación de la Tierra, cantidades del campo de gravedad y parámetros atmosféricos, y todos son vitales para la definición de los sistemas de referencia terrestres y celestes. Estos sistemas de referencia son la base de todas las aplicaciones geodésicas operativas asociadas con cartografía, navegación, adquisición y gestión de datos espaciales, así como el apoyo a las ciencias de la Tierra.

El Sistema Internacional de Referencia Celeste (ICRS) es la base para describir coordenadas celestes, mientras que el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) es básico para definir las coordenadas terrestres con la mayor precisión posible. Las definiciones de estos sistemas incluyen la orientación y el origen de sus ejes, la escala, las constantes físicas y los modelos utilizados en su realización, como el tamaño, la forma y la orientación del elipsoide de referencia que se aproxima al geoide y al modelo del campo de gravedad de la Tierra. La transformación de coordenadas entre el ICRS y el ITRS se describe con una secuencia de rotaciones que tienen en cuenta las variaciones en la orientación del eje de rotación de la Tierra y su velocidad de rotación.

Mientras que un sistema de referencia es una abstracción matemática, su realización práctica a través de observaciones geodésicas se conoce como marco de referencia. La versión convencional del ITRS es el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), que es un conjunto de coordenadas y velocidades lineales de estaciones fundamentales en tierra bien definidas. En el caso del ITRF, son las estaciones de observatorios de las redes IGS, ILRS, IVS e IDS, derivadas de observaciones geodésico-espaciales recolectadas en estos puntos, y calculadas y divulgadas por el Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS).

La superficie sólida de la Tierra consiste en una serie de grandes placas tectónicas (y muchas más pequeñas, cuyos límites están menos definidos) que se deslizan a través de la litosfera, mientras colisionan entre sí. La velocidad de las placas puede llegar a ser de un decímetro o más por año, aunque típicamente el movimiento de placas es del orden de unos pocos centímetros por año con relación a un marco fijo de coordenadas. Ese marco es posible con los ejes fijos del ITRF, definidos en un sentido inverso mediante el seguimiento de la orientación de los ejes en relación con la corteza (móvil) de la Tierra y el seguimiento de la localización del origen del sistema cartesiano con respecto al geocentro (en movimiento) mediante técnicas geodésicas.

Ha habido varias versiones diferentes del ITRF desde 1989: cada una se ha designado como ITRFaaaa, en el que aaaa se refiere al año de observación de los datos más recientes utilizados en el cálculo de las coordenadas y velocidades. Esta puede ser diferente a la época de referencia, que es la fecha en que se hace referencia a las velocidades y a las coordenadas de estación.

El ITRF se calculó inicialmente cada año, pero desde 1997 sus nuevas versiones las ha publicado el IERS a intervalos de 3–5 años; la última es ITRF2008 y se espera que la nueva versión ITRF2013 se lance a finales de 2014. A pesar de que cada solución de ITRF es internamente más precisa que la anterior, la principal diferencia en las coordenadas de las estaciones en Tierra entre diferentes ITRF refleja el movimiento de las estaciones debido a la deformación local de la corteza y a la tectónica global de placas entre las épocas de referencia de los dos marcos.

Estaciones ITRF

Un datum moderno se define por las coordenadas 3D de una red global, nacional o local de estaciones fundamentales en un instante en el tiempo. Puede ser el mismo año de época que el marco de referencia ITRFaaaa o cualquier época arbitraria. Hoy en día es relativamente fácil calcular las coordenadas de cualquier estación en la Tierra en un marco de referencia geocéntrico como el ITRF, en esa época instantánea de medición mediante tecnología GNSS. Véase el capítulo 10.

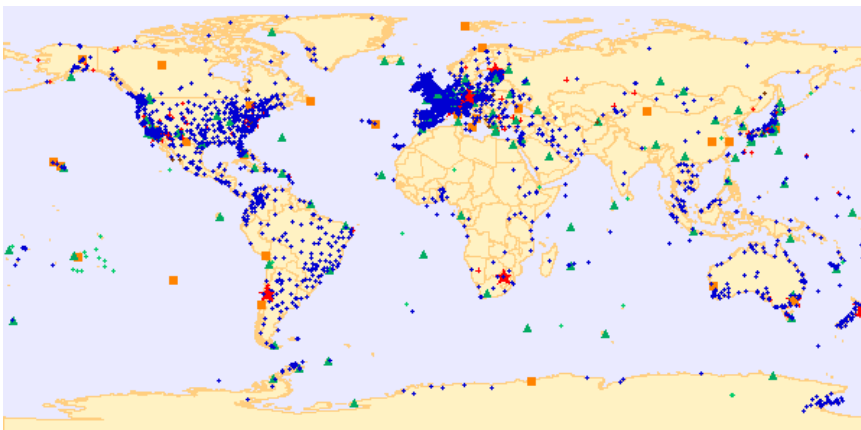


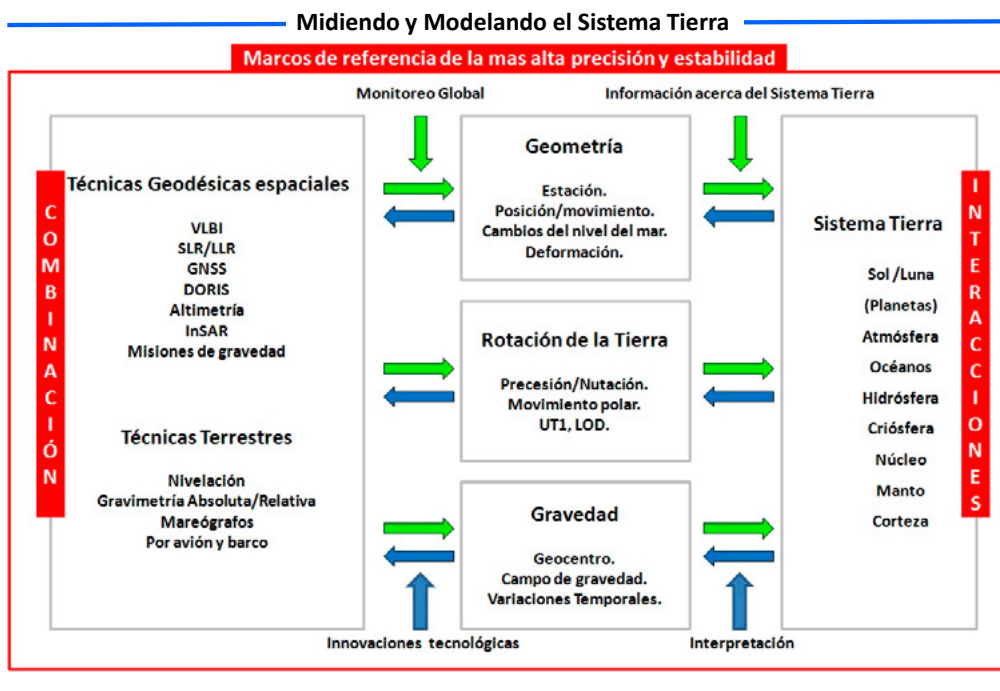
Figura 1: Estaciones de referencia geodésica.

Sistema de Observación Geodésico Mundial

Con el fin de atender los crecientes requerimientos de rendimiento para el seguimiento del cambio global, la AIG estableció en 2007 el Sistema de Observación Geodésica Mundial (GGOS). El objetivo del GGOS es coordinar todos los servicios geodésicos y proporcionar productos de alto nivel a través de un único portal. También impulsará la próxima revolución en la geodesia moderna – el análisis unificado de todos los datos geodésicos a través de modelos comunes – lo que llevará a una mejora de un orden de magnitud en la precisión geodésica (estabilidad del marco de referencia, calidad de los productos y modelos geodésicos, etc.). En otras palabras, el GGOS promoverá el desarrollo de herramientas y sistemas de observación para garantizar que el ITRF se pueda definir y supervisar con precisión milimétrica y estabilidad de mm/año.

La misión del GGOS es: (1) proporcionar las observaciones necesarias para el seguimiento, cartografía y entendimiento de los cambios en la forma de la Tierra, su rotación y distribución de masas; (2) mejorar la calidad de los marcos de referencia globales para que puedan ser la columna vertebral esencial en la medición e interpretación de los procesos clave del cambio global; y (3) para apoyar una variedad de aplicaciones en ciencias de la Tierra y de la sociedad para un posicionamiento, cartografía y modelado precisos del campo de gravedad.

La mejora resultante en la exactitud y estabilidad del marco de referencia no solo beneficiará estudios científicos críticos, como la medición del aumento del nivel del mar, sino que también proporcionará un marco más sólido para un posicionamiento GNSS preciso (de nivel centimétrico) en marcos de referencia nacionales, regionales o globales.



GGOS

Figura 2: Función del marco de referencia en la medición y modelado de los sistemas de la Tierra.

A nivel práctico, la integración de los productos de todos los servicios de la AIG implica una actualización coordinada de la infraestructura de estaciones terrestres (las estaciones IGS, ILRS, IVS, redes IDS); un aumento en el número de estaciones con las diferentes técnicas de geodesia espacial situadas en el mismo sitio; y la mejora constante y continuidad de una serie de misiones geodésicas críticas por satélite (altimetría, GNSS, gravedad, etc.). Bajo la iniciativa GGOS, se anima encarecidamente a una mayor inversión en infraestructura geodésica, como estaciones permanentes de GNSS.

Más información

- Asociación Internacional de Geodesia (AIG)
www.iag-aig.org
- Servicio Internacional de los GNSS (IGS)
www.igs.org
- Servicio Internacional de Medición Láser (ILRS)
<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
- Servicio Internacional de VLBI (IVS)
<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>
- Servicio Internacional DORIS
www.ids-doris.org
- Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS)
www.iers.org
- Servicio Internacional del Campo de Gravedad (IGF)
<http://www.gravityfield.org/node/13>
- Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF)
itrf.ensg.ign.fr
- Sistema de Observación Geodésica Mundial (GGOS)
<http://www.ggos.org>

3 SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRES GLOBALES

Neil D. Weston y Tomás Soler

Servicio Geodésico Nacional, NOAA, EE. UU.

neil.d.weston@noaa.gov

A menudo hace falta transformar entre los diferentes marcos de referencia globales. Esta sección ofrece una visión más profunda para quien desee tener conocimiento de los sistemas y marcos de referencias terrestres globales y las transformaciones entre ellos.

Introducción

El Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS) se fundó en 1988 con la misión de proporcionar:

- El Sistema Internacional de Referencia Celeste (ICRS) y su puesta en práctica, el marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF).
- El Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS), y su puesta en práctica, el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).
- Parámetros de orientación de la Tierra (EOP) para describir la relación variable en el tiempo entre el ICRF y el ITRF.
- Y estándares, constantes y modelos para coherencia internacional, así como datos geofísicos relacionados para la interpretación.

El ICRF se compone de coordenadas ecuatoriales de fuentes de radio extragalácticas observadas con VLBI, lo que forma un marco casi de inercia, mientras que el ITRF se compone de un conjunto de coordenadas cartesianas tridimensionales y sus velocidades correspondientes que, en teoría, forman un marco de referencia ideal fijado a la corteza y centrado en la Tierra.

Relaciones entre marcos de referencia globales

Una transformación de semejanza euclidiana puede relacionar dos marcos de referencia cartesianos no deformables a través de siete parámetros. Los parámetros están definidos por tres componentes de traslación $T = (T_1 \ T_2 \ T_3)^T$, tres ángulos de rotación diferencial (R_1, R_2, R_3), y un término de escala, D . Por ejemplo, si un vector de coordenadas $X_1 = (x_1 \ y_1 \ z_1)^T$ está representado en un marco de referencia, la misma coordenada puede representarse en un segundo marco de referencia como $X_2 = (x_2 \ y_2 \ z_2)^T$ mediante el uso de la siguiente ecuación (linealizada asumiendo valores de transformación relativamente pequeños):

$$X_2 = X_1 + T + DX_1 + RX_1 \quad (1)$$

con:

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} \text{ y } R = \begin{pmatrix} 0 & R_3 & -R_2 \\ -R_3 & 0 & R_1 \\ R_2 & -R_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

La matriz de rotación diferencial R es coherente con giros en los ejes de rotación positivos en el sentido contrario de la agujas de reloj (levógiro). **El IERS utiliza la convención de signos con rotación opuesta.

En la práctica, los siete parámetros de transformación cambian con el tiempo, por lo tanto, la Ecuación (1) diferencial con respecto al tiempo se puede escribir como:

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + DX_1 + \dot{R}X_1 + RX_1 \quad (3)$$

D y R están al nivel de 10^{-5} y el nivel \dot{X} es cercano a 10 cm por año, los términos DX_1 y RX_1 son despreciables y representan 0,1 mm en 100 años. Por lo tanto, la Ecuación (3) puede reducirse a:

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \quad (4)$$

Transformación general entre coordenadas X_1 y X_2

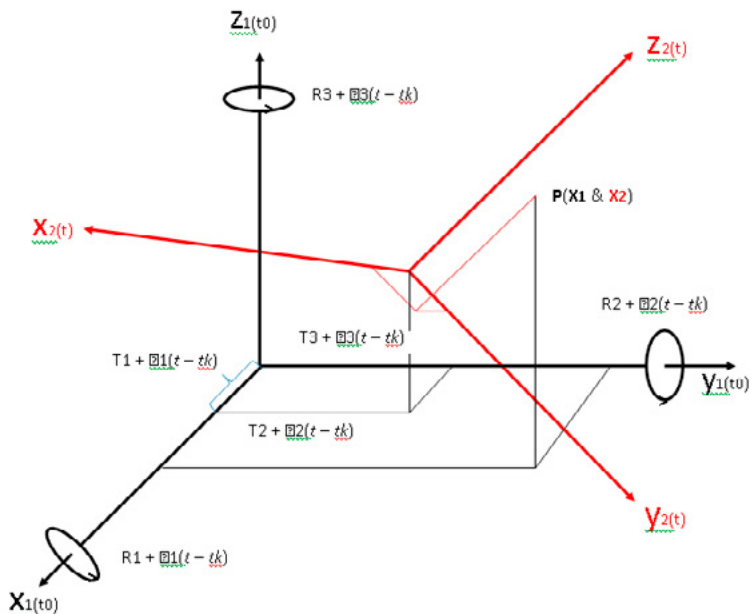


Figura 1: Ejes del marco de referencia.

Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF)

El ITRF es un marco de referencia geocéntrico global 3D que rota conjuntamente con la corteza de la Tierra en su movimiento diurno en el espacio. La más reciente versión del ITRF es ITRF2008, con la época de referencia 2005.00 y la información completa de varianza-covarianza. Este marco es equivalente al IGS08 determinado con GPS en cuanto al datum, pero se han aplicado a este último desfases de posición para compensar un cambio en las calibraciones de antenas hecho por el Servicio Internacional de los GNSS (IGS) cuando se adoptó el IGS08 en abril de 2011. El marco ITRF2008 se especifica de la siguiente manera:

1. Origen: en el geocentro promedio de largo plazo (centro de masa del sistema total de la Tierra, incluido su envolvente de fluidos líquidos y gaseosos). Este

punto es posible mediante los movimientos dinámicos de satélites que rastrean con mediciones de distancia láser a satélites (SLR).

2. El eje Z: originalmente dirigido hacia la definición convencional del Polo Norte, o, más precisamente, hacia el polo terrestre convencional (CTP), como lo define el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), pero ahora facilitado por continuidad (en desfase y razón de cambio) de cada versión ITRF con su predecesor.
3. Eje X: pasa por el punto de longitud cero (aproximadamente del meridiano de Greenwich) como lo define el IERS (y también se facilita por la continuidad.)
4. Eje Y: forma un sistema de coordenadas a derecha con los ejes X y Z (y también se facilita por la continuidad).

Las técnicas geodésicas que contribuyen al ITRF

Hay cuatro técnicas geodésicas espaciales que contribuyen a definir el ITRF, todas en una escala global. Estas son:

1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS): consiste en una constelación de al menos 24 satélites en seis planos orbitales, que disemina información mundial de navegación y horario. El sistema proporciona información posicional muy precisa en 3D para apoyar a los usuarios militares, civiles y comerciales.
2. Interferometría de línea base muy larga (VLBI): consiste en un conjunto de radiotelescopios muy grandes que reciben ondas electromagnéticas continuas de microondas de cuásares y púlsares extragalácticos para medir el retardo de observación interferométrica a través de la correlación cruzada directa de las señales.
3. Distancia láser a satélites (SLR): consiste en una red de estaciones que miden el tiempo de ida y vuelta de pulsos láser muy cortos entre estaciones y satélites que orbitan la Tierra y la Luna con retrorreflectores. Esta técnica es una de las más precisas en la determinación de la posición de los satélites, así como para determinar las variaciones temporales en el campo de gravedad de la Tierra y el geocentro y también se utiliza para muchas misiones de observación de la Tierra, como altimetría oceánica.
4. Orbitografía Doppler y radioposicionamiento integrado por satélite (DORIS): es un sistema de seguimiento Doppler con el propósito principal de la determinación precisa de órbitas y ubicaciones en tierra. Las señales de microondas se transmiten de una red de alrededor de 60 balizas terrestres y son captadas por los receptores en satélites que orbitan alrededor de la Tierra. DORIS se utiliza habitualmente para medir la órbita de satélites de observación de la Tierra (con precisiones radiales de 1 cm), como para la topografía oceánica.

Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)

El Sistema Geodésico Mundial de 1984 lo diseñó la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) con el propósito principal de apoyar al Departamento de Defensa de EE. UU. (DoD) y las fuerzas armadas. El marco de referencia es muy similar a ITRF en especificación. La última versión se publicó el 8 de febrero de 2012 y es conocida como WGS 84 (G1674). La NGA lleva a cabo actualizaciones de rutina a WGS 84 para alinearse y ajustarse a la última versión del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

Más información

- El Comité Internacional sobre los sistemas mundiales de navegación por satélite (ICG) proporciona una visión general de los marcos de referencia GNSS:
<http://www.oosa.unvienna.org/oosa/en/SAP/gnss/icg/regrefsys.html>
- Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra
www.iers.org
- El Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF)
www.iers.org/ IERS/EN/DataProducts/ICRF/ICRF/icrf.html?__nnn=true

4 MARCOS DE REFERENCIA NACIONALES Y REGIONALES

Richard Stanaway

Australia

richard.stanaway@quickclose.com.au

Los topógrafos a menudo realizan mediciones en marcos de referencia regionales o nacionales. Conforme nuestra capacidad de hacer mediciones más precisas en distancias más largas sigue mejorando, tenemos que preocuparnos por incorporar los efectos de la deformación de la corteza en nuestro datum. Esta sección proporciona información para el topógrafo sobre los diferentes tipos de marcos de referencia y datums y cómo la deformación de la corteza puede incorporarse a ellos.

Marcos de referencia globales

Un marco de referencia global suele ser la base principal para la definición de un sistema de coordenadas utilizado en la geodesia aplicada. Entre los ejemplos, se incluyen el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) y el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84). Estos marcos son geocéntricos en naturaleza, tienen el geocentro (el centro de masa de la Tierra) como origen de ejes ortogonales alineados con el polo, ecuador y el meridiano de Greenwich, de acuerdo a las convenciones del IERS. El ITRF se obtiene por las coordenadas y velocidades de una red de estaciones a nivel mundial y constituye la base de modernos marcos de referencia regionales y nacionales o datums geodésicos. Las más recientes versiones del ITRF tienen incertidumbres posicionales de estaciones contributivas en milímetros. Las velocidades de estaciones ITRF se describen con respecto a una condición de no rotación neta (NNR), en la que el momento angular de todas las placas tectónicas globales suma cero.

Marcos de referencia regionales

Los marcos de referencia regionales son redes más densas de estaciones geodésicas que cubren áreas continentales. Entre los ejemplos, se incluyen el Marco de Referencia Europeo Terrestre (EUREF), el Datum Norteamericano de 1983 (NAD83), el Marco de Referencia Africano (AFREF), el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) y el Marco de Referencia de Asia y el Pacífico (APREF). Al igual que con el ITRF, los marcos de referencia regionales se definen mediante las coordenadas y velocidades de las estaciones. La diferencia clave entre un marco de referencia regional (por ejemplo, EUREF y NAD83) y el ITRF es que las velocidades del sitio pueden darse con respecto a la placa tectónica dominante abarcada por el marco y no una condición NNR. Este enfoque minimiza las velocidades del sitio. Los marcos regionales no limitados por el movimiento de una sola placa tectónica están estrechamente alineados con el ITRF.

Marcos de referencia nacionales

Los marcos de referencia nacionales modernos son a menudo una versión estática del ITRF o del marco de referencia regional. En la mayoría de los países, las coordenadas

de un marco de referencia nacional (o datum geodésico) son la base de todos los levantamientos, posicionamientos y de la cartografía dentro de las fronteras nacionales. Debido a que el software topográfico/SIG y los datos espaciales no están diseñados para tratar con cambios continuos en las coordenadas, la época para el datum nacional es fija y las coordenadas se consideran invariantes en el tiempo.

Tipos de datums geodésicos

Los **datums geodésicos estáticos** alineados con una época fija (o época de referencia) de una versión del ITRF actualmente dan soporte a la mayoría de usuarios geoespaciales; sin embargo, hay algunas limitaciones prácticas con un datum estático si se utilizan técnicas de posicionamiento GNSS. La técnica de posicionamiento de punto GNSS utiliza los modelos orbitales definidos en los marcos de referencia WGS84 o del ITRF. Como consecuencia, la ubicación precisa dentro de estos marcos cambiará como una función de tiempo debido a procesos tectónicos y a otras fuentes de deformación como la subsidencia, el levantamiento del suelo y el rebote posglaciar. Está incrementando rápidamente la accesibilidad y se está reduciendo el coste del posicionamiento preciso a nivel centimétrico. A menos que se localicen posiciones GNSS precisas (por ejemplo mediante una red local CORS o mediante la transformación de un sitio en una marca de referencia geodésica), los usuarios notarán que las posiciones de objetos “fijos” (en un marco de referencia local) cambian cada pocos meses. Las placas tectónicas rígidas giran lentamente con el manto de la Tierra, pero la rotación se da a una velocidad suficientemente rápida como para introducir errores en el procesamiento GNSS de líneas base estáticas y en RTK para líneas largas si la velocidad de rotación es alta y hay una gran diferencia entre las épocas de medición y de referencia.

En muchos lugares cerca de los límites de placas tectónicas, como los estados occidentales de los EE. UU., Chile, Japón, Indonesia, China, Papúa Nueva Guinea, Nueva Zelanda, Grecia, Pakistán y el norte de África, la suposición de un datum estático a nivel nacional es inadecuada. En estos lugares la magnitud de la deformación en el límite de placa puede ser de algunos cm/año entre dos estaciones geodésicas en la red nacional, con una posible deformación de metros después de grandes terremotos.

Para permitir que las posiciones GNSS precisas se utilicen en el contexto de un datum geodésico estático, se requiere que estas deformaciones complejas se modelen de alguna manera. Un **datum semicinemático** (o datum semidinámico) es aquel en que un modelo de deformación forma parte integral de la definición del datum. La determinación de posiciones GNSS de puntos y el análisis de datos geodésicos se llevan a cabo en el marco de referencia ITRF cinemático, mediante la última versión de ITRF. Luego las coordenadas resultantes se propagan de regreso a la época de referencia fija del datum semicinemático, de modo que los datos espaciales pueden integrarse sin fisuras durante largos periodos de tiempo. La utilidad del enfoque del datum semicinemático es que la precisión del análisis de los datos no se degrada como resultado de la deformación no modelada; sin embargo, para el usuario final, el datum geodésico de referencia parece estático en una época de referencia fija.

Un **datum totalmente cinemático** supera muchas de las limitaciones de la deformación no modelada en el posicionamiento, pero la limitación principal (actualmente) es que es muy difícil la integración de datos espaciales adquiridos durante un periodo de tiempo más largo, salvo que un modelo de deformación preciso esté incrustado en el dato o alguna referencia de forma explícita. La inclusión de modelos de deformación

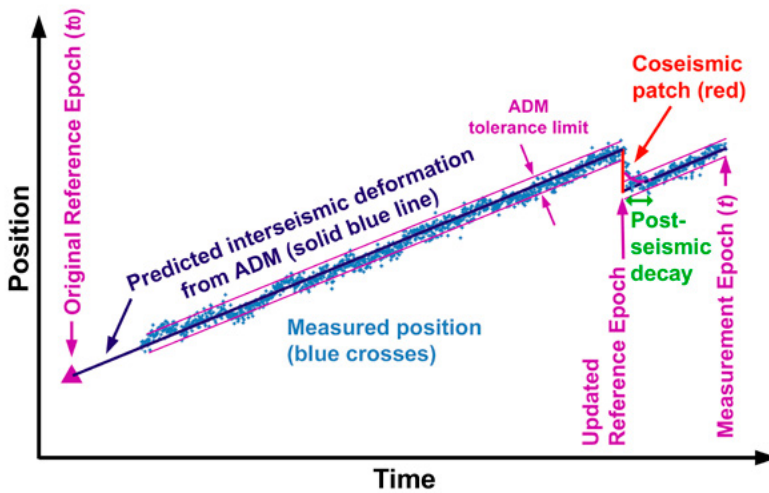


Figura 1: Deformación observada y modelada a través del tiempo.

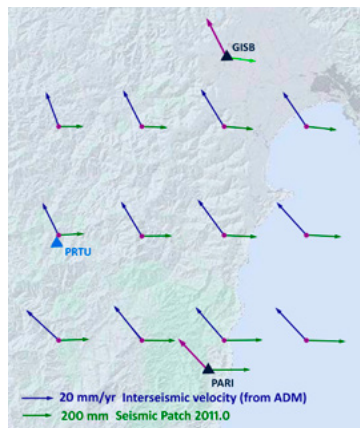


Figura 2: Velocidades intersísmicas y de deformación intersísmica.

en SIG y en las infraestructuras de datos espaciales es actualmente un área de investigación, aunque su implementación aún se ve lejana. Hasta entonces, un enfoque más práctico y lógico es aplicar un modelo de deformación después de la captura de datos GNSS, de modo que las coordenadas resultantes se puedan utilizar en marcos estáticos de datos espaciales y SIG.

Modelos de deformación

Actualmente existen varios enfoques para el uso de modelos de deformación en aplicaciones geodésicas prácticas. Para regiones situadas en placas tectónicas rígidas, puede emplearse un modelo de placa rígida (3 parámetros) que define el polo Euler de

rotación, un enfoque que actualmente está adoptando Trimble en su servicio RTX. Otro enfoque es usar una transformación de 14 parámetros (transformación conforme de 7 parámetros más tasas de cambio respectivas), que es el enfoque actual usado en Australia para transformar coordenadas ITRF en la época de medición a GDA94, que es un datum estático fijado en la época 1994.0.

Las transformaciones de placa rígida no funcionan satisfactoriamente en zonas en que están ocurriendo deformaciones internas o estas son complejas por naturaleza (Fig. 1). Un enfoque de modelo de deformación cuadrículada se utiliza actualmente en Nueva Zelanda para permitir la transformación de ITRF en la época de medición a NZGD2000 (época 2000.0). Los modelos de deformación cuadrículados pueden tener resolución variable para poder adaptarse a la complejidad de la deformación y a los requisitos de precisión de los usuarios. Dicho modelo de deformación se calcula a partir de una red geodésica densa con observaciones repetidas durante un periodo de tiempo suficientemente largo como para estimar las velocidades ITRF de las estaciones de la red. Las velocidades de esos sitios pueden analizarse e invertirse para estimar los polos de Euler de bloques rígidos de la corteza, la distribución del deslizamiento y, posteriormente, las velocidades de sitios sobre una malla regular. Un modelo de deformación típico se describe con una rejilla de latitudes y longitudes con velocidades asociadas a cada sitio en sus componentes este (longitud), norte (latitud) y altura (elevación).

Los eventos de deformación episódicos, como terremotos, requieren modelos de deformación complementarios. A menudo, estos eventos son importantes a escalas localizadas y pueden explicar un cambio permanente en las coordenadas en una época posterior al evento para reflejar la realidad. Un modelo de deformación episódica puede dar cuenta de estos eventos de deformación localizados y el uso de este modelo permite que la tecnología GNSS se utilice en una infraestructura espacial presísmica mediante su aplicación inversa. Este modelo se define de la misma forma que el de velocidad, pero con magnitudes de deformación fijas para cubrir el periodo del terremoto, sus réplicas y la deformación postsísmica (Fig. 2). Una vez más, los datos de origen del modelo suelen ser mediciones GNSS repetitivas en una densa red de estaciones geodésicas pasivas. Sin embargo, también pueden utilizarse InSAR, LIDAR, imágenes de alta resolución y modelos geofísicos de alta resolución para definir una rejilla de deformaciones de la superficie asociados con un evento de deformación.

5 SISTEMAS DE ALTURA

Daniel R. Roman

Servicio Geodésico Nacional, NOAA, EE. UU.

dan.roman@noaa.gov

Tradicionalmente el topógrafo está interesado en la determinación de alturas en cuanto al nivel del mar, algo que es de interés por razones relacionadas con el flujo de agua: por ejemplo, ¿cómo de alto es un edificio con relación al nivel de una inundación causada por un río? Sin embargo, los sistemas de posicionamiento por satélite determinan alturas relativas al elipsoide y estas deben convertirse en unas más útiles referidas al nivel del mar para muchas aplicaciones. Esta sección describe los diversos sistemas de alturas y cómo la altura puede transformarse entre estos sistemas.

La relación entre la gravedad y el Sistema Mundial de Altura (WHS)

La nivelación tradicional, los sistemas de altura y los datum verticales se relacionan al posicionamiento en el campo de gravedad de la Tierra. Al alejarse del centro de la Tierra (geocentro), se produce un menor potencial de gravedad (geopotencial), que está directamente relacionado con el cambio de altura. El geopotencial se mide en unidades de m^2/s^2 y se divide por algún valor de gravedad para llegar a una altura, como por ejemplo:

$$m^2/s^2 \div m/s^2 = m$$

La gravedad normal desde el elipsoide (γ) proporciona alturas normales. El valor de la gravedad promedio a lo largo de la línea de plomada desde la superficie hasta el geoide aporta alturas ortométricas. Un valor constante de la gravedad (generalmente y en la latitud 45) brinda alturas dinámicas. Estas alturas son todas diferentes, aunque utilizan los mismos números geopotenciales, por lo que la unificación de los sistemas de altura podría basarse en un Modelo de Gravedad de la Tierra o Global (GGM/EGM).

Uno de estos modelos disponibles en la actualidad es el modelo de gravedad de la Tierra 2008 (EGM2008), producido por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) de EE. UU., que puede emplearse para generar diversos aspectos del campo de gravedad de la Tierra, incluidas alturas del geoide y anomalías de la gravedad.

Cómo las mediciones GNSS están vinculadas a alturas ortométricas locales

El enlace principal es a través del modelo de alturas del geoide. Como se señaló anteriormente, una altura geoidal se mide desde la superficie de un elipsoide específico a la superficie de un geoide específico, o datum vertical. Por lo tanto, los modelos de altura del geoide son alturas elipsoidales y están intrínsecamente ligadas a un marco de referencia geométrico específico. Las alturas elipsoidales (h) determinadas mediante técnicas GNSS en un marco de referencia específico en conjunto con las alturas geoidales asociadas (N) permiten estimar alturas ortométricas (H), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$H = h - N$$

El orden de las operaciones es entonces:

- Obtener la posición utilizando el GNSS en el marco de referencia requerido.
- Interpolarse el modelo de alturas del geoide en la latitud y la longitud obtenidas.
- Restar la altura interpolada del modelo geoidal de la altura elipsoidal obtenida.
- Esto da como resultado la altura ortométrica deseada.

Las relaciones entre los diversos aspectos del campo de gravedad de la Tierra

El modelo promedio de la Tierra se describe con un elipsoide de rotación, que tiene cierta masa, velocidad de giro y forma, y coincide con la Tierra real al 99,999 %. Sin embargo, la diferencia ronda +/- 100 metros, algo significativo a escalas humanas. La diferencia surge de la falta de uniformidad en la forma en que se distribuye la masa de la Tierra. La masa es la clave: las variaciones de la masa están directamente relacionadas con todos los aspectos del campo de gravedad de la Tierra. Si la Tierra fuera uniforme en la distribución de la masa, entonces el modelo basado en el elipsoide podría ser suficiente. Sin embargo, la masa de la Tierra varía en gran medida, algo que es de interés.

La roca oceánica sumergida y más delgada se encuentra junto a la roca continental, que es diez veces más gruesa, y supone una señal de gravedad de longitud de onda larga porque describe características a escala continental y oceánica. La topografía de la Tierra ofrece una gran cantidad de señales de gravedad de longitud de onda corta porque el contraste de densidad entre la roca y el aire es mucho mayor que el contraste entre diferentes tipos de roca. El efecto gravitacional de una cadena de montañas es de longitud de onda larga, pero el efecto de una única montaña es de longitud de onda corta.

El efecto acumulativo de todas las masas de la Tierra se expresa en funciones diferentes, pero relacionadas, del campo de gravedad (llamadas funcionales). La gravedad y el geopotencial son dos funcionales ya cubiertas, pero los valores asociados a estas funcionales de señal completa son bastante grandes. La mayoría de las aplicaciones del campo de gravedad retiran algún tipo de valor del modelo del elipsoide de referencia. El Sistema de Referencia Geodésico de 1980 (GRS80) y el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84) son dos de estos modelos.

La diferencia entre la gravedad real (g) y la gravedad normal en el elipsoide (γ) es una anomalía de gravedad (Δg). La diferencia entre el geopotencial real (W) y el potencial en el elipsoide (U) es el potencial perturbador (T). Las alturas del geoide (N) representan la diferencia entre las alturas sobre el elipsoide (h) y las alturas sobre el geoide o datum vertical (H).

$$\Delta g = g - \gamma$$

$$T = W - U$$

$$N = h - H$$

A su vez, tanto las alturas geoidales como las anomalías de la gravedad están relacionadas con el potencial perturbador:

$$\Delta g = -(\partial T) / (\partial r) - (2 T) / r \quad N = T / \gamma$$

Tanto las anomalías de gravedad como las alturas geoidales se expresan en términos de geopotencial y pueden relacionarse mediante una fórmula compleja llamada la ecuación de Stokes. Esto es útil porque las observaciones de gravedad se crean fácilmente y se manipulan para determinar un geoide para su uso como datum vertical.

Cómo se determinan los modelos de geoides y se utilizan como datum vertical

Los modelos como EGM2008 se hicieron a partir de muchas fuentes. Los satélites en órbita, como GRACE y GOCE, proporcionan la señal de longitud de onda larga, mientras que la gravedad de la superficie y los modelos de topografía proporcionan la señal de longitud de onda corta. Su combinación resulta en un modelo de precisión submétrica para 10 km y elementos más largos. Para una mayor precisión, suelen hacer falta modelos regionales.

Los modelos regionales se desarrollan utilizando un EGM como modelo de referencia y se mejoran con una señal de longitud de onda más corta que tuvo que omitirse del modelo global para que la solución del EGM siguiera siendo factible. Muchas veces, se utilizan las mismas observaciones de gravedad superficiales, pero la mayoría de la señal se retiene en el producto final.

En sus longitudes de onda más largas, los modelos regionales reflejan datos satelitales (escalas > 200 km), lo que los hace compatibles con cualquier Sistema Mundial de Altura (WHS). Entonces los datos de gravedad aéreos y de superficie, así como los modelos del terreno, completan las longitudes de onda más cortas en la resolución del modelo regional (escalas 2–5 km). Con esa información extra, los modelos regionales del geoides pueden tener una precisión de subdecímetros a subcentímetros. Entonces, este modelo puede combinarse con observaciones GNSS para producir alturas ortométricas.

Más información

Las siguientes páginas web ofrecen mayor información:

- EGM2008
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008>
- GRACE
<http://www.csr.utexas.edu/grace/>
- GOCE
<http://earth.esa.int/GOCE>
- GRS-80
http://www.gfy.ku.dk/~iag/HB2000/part4/grs80_corr.htm
- Servicio internacional de geoides
<http://www.iges.polimi.it/>

6 TRANSFORMACIÓN ENTRE DATUMS

Graeme Blick y Chris Crook

Información del Territorio de Nueva Zelanda

gblick@linz.govt.nz

El topógrafo a menudo necesita transformar datos entre distintos sistemas de referencia, como la transformación de coordenadas recientemente obtenidas de un datum oficial a un datum más antiguo, o viceversa. Esta sección proporciona información sobre los métodos de transformación de uso general y algunos de los casos más específicos utilizados para la transformación entre datums.

Introducción

Las coordenadas pueden convertirse de un datum a otro si se conoce la relación entre ambos, que describen dos componentes:

- Un conjunto de fórmulas que describen las matemáticas del proceso de transformación
- Un conjunto de parámetros, descritos como parámetros de transformación, que se utilizan en las fórmulas.

A menudo, puede definirse más de una transformación para convertir entre datums. Por ejemplo, pueden existir transformaciones simples de baja precisión y transformaciones más complejas de mayor precisión.

Los parámetros de transformación se obtienen mediante el análisis de estaciones de control de levantamientos, que tienen coordenadas en ambos datums. El número mínimo de estaciones requerido para este proceso depende del método de transformación. Sin embargo, no hay límite máximo, y en general se utilizará tantas estaciones como sea posible.

La precisión de una transformación puede evaluarse mediante la comparación de coordenadas transformadas en puntos que cuentan con coordenadas conocidas en los dos datums.

Considere la siguiente situación típica en la que tenemos:

- Conjunto de coordenadas 1 calculadas a partir de la red 1 en el datum 1
- Conjunto de coordenadas 2 calculadas a partir de la red 2 en el datum 2.

Si las coordenadas de conjunto 1 se convierten al datum 2, generalmente no coincidirán exactamente con las coordenadas del conjunto 2. Esto se debe a que los conjuntos de coordenadas se derivan de diferentes levantamientos o geometrías de red (por ejemplo, la red 1 pudo haberse medido por triangulación y la red 2 por GPS) y una red aparecerá desplazada y distorsionada con respecto a la otra.

Las diferencias entre las coordenadas transformadas del datum 1 y las coordenadas del datum 2 se conocen también como residuos. Su magnitud proporciona una indicación de la calidad de la red conservada en los dos datums, así como una indicación de la precisión de la transformación entre esos datums.

Los parámetros de transformación los generan habitualmente las agencias cartográficas y están disponibles libremente para los usuarios, pero también suelen incorporarse en software de transformación, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Transformaciones de similitud

Los datums modernos tridimensionales suelen estar relacionados mediante una transformación de similitud, que permite una diferencia en la ubicación, rotación y escala entre los dos datum, pero no distorsión alguna en ellos. Aquí se incluyen transformaciones de tres, siete y catorce parámetros.

La transformación de siete parámetros expresa la relación entre los dos datum en términos de traslación, rotación y factor de escala. La traslación y la rotación se definen para cada uno de los tres ejes de coordenadas, haciendo un total de siete parámetros.

Las siguientes fórmulas se utilizan para convertir las coordenadas cartesianas del datum 1 al datum 2 aplicando una transformación de siete parámetros (Fig. 1):

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + (1 + \Delta_S) \begin{bmatrix} 1 & -R_Z & +R_Y \\ +R_Z & 1 & -R_X \\ -R_Y & +R_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

donde

X_1, Y_1, Z_1 son las coordenadas cartesianas del datum 1

X_2, Y_2, Z_2 son las coordenadas cartesianas de datum 2

T_X, T_Y, T_Z es la diferencia entre los centros de los dos elipsoides

R_X, R_Y, R_Z son las rotaciones alrededor de los tres ejes de coordenadas en radianes,

Δ_S es la diferencia de escala entre los sistemas de coordenadas expresada como una relación.

Típicamente las rotaciones se publican en unidades de segundos de arco o milisegundos de arco (mas) y la escala en partes por millón (ppm) o partes por mil millones (ppb).

Hay que tener en cuenta que estas fórmulas, que se utilizan comúnmente en la geodesia, se simplifican en la presunción de que las rotaciones son pequeñas (unos pocos segundos de arco).

Tenga en cuenta además que hay ambigüedad en la convención de signos para las rotaciones. Las rotaciones proporcionadas por algunas agencias pueden necesitar un cambio de signo para utilizarse en estas fórmulas.

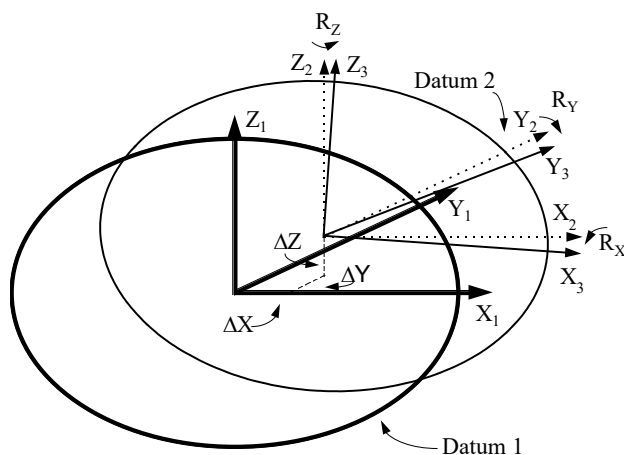


Figura 1: Transformación entre el datum 1 y el datum 2.

La transformación de catorce parámetros es una variación de la transformación de siete parámetros en la que a cada parámetro se le asigna tanto un valor en una época de referencia como una tasa de cambio. Por ejemplo, la rotación alrededor del eje X estará representada por su valor R_{X0} en la época de referencia t_0 y su tasa de cambio R'_{X0} . La rotación R_X en el tiempo t se calcula como

$$R_X = R_{X0} + (t - t_0) R'_{X0}$$

La transformación de catorce parámetros se utiliza a menudo para expresar la relación entre datums modernos de alta precisión, como las soluciones del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF): ver http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt

La transformación de tres parámetros es un caso especial de la transformación de siete parámetros en el que las rotaciones y la diferencia de escala son 0 y los datums difieren solamente en ubicación.

Otros métodos de transformación

Las transformaciones de tres, siete y catorce parámetros se aplican entre datums tridimensionales, normalmente establecidos mediante levantamiento GNSS. Es decir, el datum define alturas elipsoidales, pero también latitud y longitud. Tampoco tienen en cuenta la posible distorsión en los datums, aparte de una diferencia en escala.

Los datums antiguos suelen ser de dos dimensiones, que definen latitud y longitud, pero no la altura elipsoidal. Estos pueden contener distorsiones debido a las limitaciones de las técnicas topográficas con las que se establecieron y debido a la deformación producida desde entonces.

Estos datums pueden tener todavía tres o siete parámetros de transformación de similitud definidos que los relacionan con sus contrapartes modernas. Si bien estos no pueden ser la causa de la distorsión, están bien soportados en el software de levantamiento y pueden ser lo suficientemente precisos para muchos usuarios. Cuando se usan tales transformaciones, puede ignorarse la ordenada de altura. Para las transformaciones precisas entre tales datums se necesita una definición más compleja.

Un método común se basa en una rejilla o cuadrícula de transformación, es decir, una rejilla de puntos definida en latitudes y longitudes del datum 1. En cada punto de la cuadrícula se define la latitud y longitud correspondiente del datum 2. La transformación en otros puntos se obtiene por interpolación a través de la cuadrícula de celdas en la que se encuentra el punto.

Las transformaciones de cuadrícula se publican a menudo con el formato NTV2. Este se utiliza en muchas jurisdicciones y le da soporte a una amplia gama de software SIG. Para más detalles, vea <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/9074>

Otro ejemplo de un método de transformación utilizado en Suecia supone representar la relación entre un datum de cuadrícula local y un datum geodésico nacional mediante el mejor ajuste posible de la proyección transversa de Mercator. Para ello, vea http://www.lantmateriet.se/Global/Kartor%20och%20geografisk%20information/GPS%20och%20m%c3%a4tning/Geodesi/Rapporter_publicationer/Rapporter/Rapport_Reit_eng.pdf

7 TRANSFORMACIÓN ENTRE DATUMS DE MARCOS DE REFERENCIA NO ESTÁTICOS.

Nic Donnelly

Información del Territorio de Nueva Zelanda, Nueva Zelanda
ndonnelly@linz.govt.nz

Los topógrafos están trabajando cada vez más en marcos de referencia no estáticos que tienen en cuenta los efectos de los movimientos de la corteza terrestre. En esta sección se detalla el caso específico de la transformación entre estos marcos de referencia no estáticos.

Introducción

Los marcos de referencia no estáticos pueden describirse con una serie de términos, como cinemáticos o semicinemáticos (o dinámico, semidinámico). Lo que todos tienen en común es un medio (y requisito) para tener en cuenta el hecho de que la Tierra está siempre en movimiento.

Casos de uso

A menudo, las organizaciones gubernamentales o proveedores de software desarrollarán herramientas para facilitar las transformaciones. Sin embargo, hay situaciones en las que el topógrafo tiene que entender y ser capaz de llevar a cabo estas transformaciones. Por ejemplo:

1. Se está probando un nuevo software o equipo.
2. Los modelos oficiales utilizados en las transformaciones no son lo suficientemente precisos para el área del proyecto.
3. Las herramientas de transformación en línea o el software no están disponibles.

Ejemplo general

La obtención de las coordenadas precisas en la última versión del ITRF se ha simplificado en gran medida mediante la prestación de servicios de procesamiento GNSS en línea. Muchos de ellos proporcionan una posición absoluta con la técnica Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). Sin embargo, la mayoría de jurisdicciones o aplicaciones de posicionamiento requieren coordenadas en un marco de referencia local. Aunque podríamos hacer conexiones relativas a puntos de control proporcionados por la agencia geodésica nacional, este no siempre es el método más eficiente. Una transformación puede utilizarse para convertir coordenadas ITRF al marco de referencia local.

Ejemplo

El envío de datos GNSS a un servicio en línea de procesamiento permite obtener coordenadas ITRF2008 (época 2012.16) de siete estaciones existentes y de tres nuevas estaciones en Nueva Zelanda. En el área de nuestro levantamiento, el marco de referencia oficial es ITRF96 (época 2000.0). Cada una de las siete estaciones existentes cuenta con

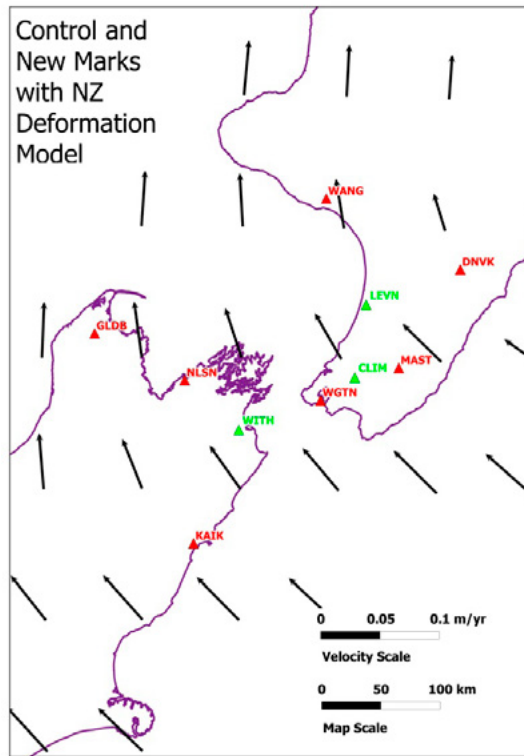


Figura 1: Estaciones existentes (triángulos rojos), nuevas estaciones (triángulos verdes) y velocidades en cuadrícula.

valores publicados en ITRF96 (época 2000.0) y hay un modelo de velocidad en cuadrícula disponible para nuestra área de interés (Fig. 1).

Hay que tener en cuenta que a lo largo de este ejemplo, las coordenadas y las velocidades se refieren al marco de referencia geocéntrico.

Paso 1 Calcular coordenadas ITRF96 época 2012.16

En este paso se utiliza el modelo de velocidad oficial y las coordenadas ITRF96 (época 2000.0) publicadas para calcular las coordenadas ITRF96 en la misma época para la cual contamos con coordenadas ITRF2008 (época 2012.16), mediante la ecuación (1):

$$\mathbf{X}_{\text{ITRF96 época 2012.16}} = \mathbf{X}_{\text{ITRF96 época 2000.0}} + 12.16\mathbf{V}_{\text{XYZ}} \quad (1)$$

Mediante la ecuación (1) para la estación GLDB:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{2012.16} = \begin{bmatrix} -4792405.831 \\ 628416.781 \\ -4148068.669 \end{bmatrix} + 12.16 \begin{bmatrix} -0.0285 \\ 0.0045 \\ 0.0333 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4792406.177 \\ 628416.835 \\ -4148068.263 \end{bmatrix}$$

Coordenadas publicadas en ITRF96 época 2000.0

Interpolado desde el modelo de velocidad publicado

Paso 2 Calcular los parámetros de transformación entre ITRF96 e ITRF2008 en la época 2012.16

Aquí se utiliza el conocido método de mínimos cuadrados para estimar los parámetros de transformación. En este caso elegimos estimar solo tres parámetros, debido a la limitada extensión de la zona de estudio en comparación con la Tierra en su conjunto.

- Utilizamos mínimos cuadrados para obtener la mejor solución, ya que tenemos más observaciones que parámetros.
- Modelo funcional: $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{b}$, donde \mathbf{A} es la matriz de diseño, \mathbf{b} = calculado (ITRF96) menos observado (ITRF2008) y \mathbf{t} es la matriz de los parámetros de transformación desconocidos.
- Modelo estocástico: $\mathbf{W} = \mathbf{I}$, en este caso elegimos ponderar igual todas las coordenadas.

Tenemos las ecuaciones estándar de mínimos cuadrados:

$$\mathbf{t} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T\mathbf{b} \tag{2}$$

$$\text{Cov}(\mathbf{t}) = s_0^2 (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \tag{3}$$

Error estándar *a posteriori* de peso unitario

$$s_0^2 = (\mathbf{A}^T\mathbf{t} - \mathbf{b})^T(\mathbf{A}^T\mathbf{t} - \mathbf{b}) / (\text{grados de libertad}) \tag{4}$$

Este es un problema lineal, por lo que no hay necesidad de iterar

<i>GLDB</i>	<i>x</i>	$A =$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$b =$	$\begin{bmatrix} -4792406.177 \\ 628416.835 \\ -4148068.263 \end{bmatrix}$	$-$	$\begin{bmatrix} -4792406.117 \\ 628416.851 \\ -4148068.23 \end{bmatrix}$	$=$	$\begin{bmatrix} -0.06 \\ -0.016 \\ -0.033 \end{bmatrix}$
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>NLSN</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>KAIK</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>WGTV</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>MAST</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>DNVK</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								
<i>WANG</i>	<i>x</i>								
	<i>y</i>								
	<i>z</i>								

Calculated ITRF96 Epoch 2012.16 coordinates	Observed ITRF2008 Epoch 2012.16 coordinates
---	--

Los parámetros de transformación calculados mediante las ecuaciones (2), (3) y (4) son:

- $s_0^2 = 0.015$ m
- $t_x = -0.046 \pm 0.006$ m
- $t_y = -0.016 \pm 0.006$ m
- $t_z = -0.039 \pm 0.006$ m

Nota: En este caso los mínimos cuadrados simplemente generan el promedio de las diferencias de las coordenadas, por lo que se podría haber evitado el álgebra de matrices, pero no se tendría información de precisión tan fácilmente.

Paso 3: Calcular coordenadas en la época del levantamiento para nuevas estaciones

Ahora aplicamos los parámetros de transformación para obtener las coordenadas para cada nueva estación en ITRF96 (época 2012.16):

$$\mathbf{X}_{\text{ITRF96 época 2012.16}} = \mathbf{X}_{\text{ITRF2008 época 2012.16}} + \mathbf{t} \quad (5)$$

Mediante la ecuación (5) para la estación CLIM:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ITRF96 2012.16}} = \begin{bmatrix} -4793404.120 \\ 407108.010 \\ -4175081.520 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.046 \\ -0.016 \\ -0.039 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4793404.167 \\ 407107.994 \\ -4175081.559 \end{bmatrix}$$

Paso 4: Calcular coordenadas en la época de referencia para nuevas estaciones

$$\mathbf{X}_{\text{ITRF96 época 2000.0}} = \mathbf{X}_{\text{NZGD2000 época 2012.16}} - 12.16 \mathbf{V}_{xyz} \quad (6)$$

Mediante la ecuación (6) para la estación CLIM:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ITRF96 época 2000.0}} = \begin{bmatrix} -4793404.167 \\ 407107.994 \\ -4175081.559 \end{bmatrix} - 12.16 \begin{bmatrix} -0.0196 \\ 0.0277 \\ 0.0250 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4793403.928 \\ 407107.657 \\ -4175081.864 \end{bmatrix}$$

8 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL MARCO DE REFERENCIA MEDIANTE LA TÉCNICA DE MÍNIMOS CUADRADOS

Roger Fraser

Servicio Geodésico, Victoria, Australia

roger.fraser@dtpli.vic.gov.au

Cuando se establece o propaga un marco de referencia a partir de una serie de mediciones, el topógrafo debe estimar coordenadas de las estaciones y sus precisiones para evaluar la calidad de las mediciones. Estas tareas se suelen llevar a cabo mediante el método de los mínimos cuadrados. Esta sección se centra en la propagación de un marco de referencia internacional o regional en las estaciones nacionales o locales.

Introducción

La estimación de parámetros en estaciones terrestres fundamentales con una serie repetida de mediciones de esas estaciones es fundamental en la tarea de hacer realidad marcos de referencia geodésicos, ya sean locales, nacionales, regionales o globales. Entre los parámetros de interés pueden incluirse, por ejemplo, el origen del marco de referencia, la orientación y la escala, las coordenadas de la estación, las velocidades lineales, las separaciones geoide-elipsoide, la distorsión del datum y los coeficientes de deformación. Las mediciones son, en su mayoría, en forma de conjuntos continuos obtenidos de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) a través de Estaciones de Referencia de Funcionamiento Continuo (CORS).

Mientras que cada geodesta/topógrafo que participa en el proceso de medición siempre se dedica a obtener las mediciones más exactas y precisas, el verdadero valor de los parámetros por estimar nunca puede derivarse con certeza absoluta, debido a la influencia ineludible del error en el proceso de medición. Esto es cierto incluso para las técnicas de medición geodésicas más sofisticadas y precisas.

Con el fin de lograr la estimación más fiable de los parámetros de la estación y su incertidumbre, así como para dar al topógrafo un medio para identificar y eliminar el error inaceptable de las observaciones, debe utilizarse una técnica de estimación rigurosa. Con el fin de hacer realidad el marco de referencia, la técnica de mínimos cuadrados es ideal para la tarea de estimar los parámetros del marco de referencia.

Definición y propagación del marco de referencia

En el contexto de la geodesia de marco de referencia, por lo general se llevará a cabo un ajuste para satisfacer uno de los dos objetivos: *definir* (o establecer) un marco de referencia o *propagar* un marco de referencia a otras estaciones. Para el primero, que está pensado para establecer los parámetros primarios del marco de referencia (como en una versión particular del ITRF), además de las posiciones, velocidades y las incertidumbres de las estaciones fundamentales, se incluirán en la solución un gran conjunto de mediciones de diversas técnicas de medición geodésicas terrestres y del espacio. La versión del ITRF es responsabilidad del Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS).

Cuando la propagación de un marco de referencia se realiza sobre otras marcas relacionadas con las estaciones fundamentales, se introducirán las posiciones y las incertidumbres de las estaciones fundamentales en la solución como cantidades medidas. Esto se produce de modo que la ubicación, la orientación y la escala del marco de referencia restrinjan la solución y, por lo tanto, produzcan la posición y las incertidumbres alineadas a ese marco. Este es el procedimiento que suele seguirse al establecer marcos de referencia regionales, nacionales y locales.

El modelo matemático: el vínculo vital entre observaciones geodésicas y los parámetros del marco de referencia

El primer paso en la estimación de parámetros mediante la técnica de mínimos cuadrados es identificar el modelo matemático que debidamente relaciona las observaciones de los parámetros de interés. En forma de matriz, la relación entre un conjunto de observaciones \mathbf{m} y parámetros desconocidos \mathbf{x} puede escribirse como:

$$\mathbf{m} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

donde \mathbf{A} es la matriz de coeficientes que describe la relación matemática lineal entre las dos cantidades. En la geodesia clásica, un modelo matemático se compone de un modelo funcional y de un modelo estocástico.

Un **modelo funcional** expresa la relación determinista entre una observación y los parámetros desconocidos. En términos generales, una observación \mathbf{m} puede expresarse como:

$$\mathbf{m} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

donde x_1, x_2, \dots, x_n son los parámetros que estimar y f es la función que relaciona las observaciones con los parámetros desconocidos. Las funciones utilizadas en geodesia varían considerablemente en propósito y complejidad, que van desde la unidad hasta funciones matemáticas complejas. Las funciones de las observables también pueden incluir uno o más parámetros desconocidos y contener varios coeficientes.

Un **modelo estocástico** representa las propiedades estadísticas de las observaciones y se utiliza para determinar la cantidad de la contribución que cada medición debe tener en la solución. El modelo estocástico también puede incluir restricciones adicionales y estimaciones de incertidumbre que deben imponerse a la solución. Estas estimaciones se pueden usar para tener en cuenta errores sistemáticos conocidos, pero no modelados, en el proceso de medición. En otros casos, las restricciones pueden ser en forma de incertidumbres en la posición de la estación derivadas de soluciones previas.

El modelo estocástico está representado por una matriz de varianza \mathbf{V} . Los elementos diagonales en la matriz de varianza se expresan en términos de desviaciones estándar al cuadrado (es decir, la varianza). Los términos fuera de la diagonal representan dependencia estadística (o correlación) entre las varianzas respectivas. La formulación de matrices de varianza GNSS suele manejarse por software de análisis de GNSS, aunque las varianzas de las mediciones terrestres convencionales pueden requerir la intervención humana. La estimación rigurosa de esta matriz es de suma importancia para la consecución de estimaciones fiables de los parámetros de la estación y sus incertidumbres.

Si bien es posible estimar los parámetros solamente desde el modelo funcional, el modelo funcional y el modelo estocástico deben tenerse en cuenta en conjunto si se re-

quiere una estimación rigurosa y fiable de los parámetros. Dado que los parámetros son una función directa de las observaciones, se deduce que la calidad de los parámetros estimados es una función directa de la calidad de las observaciones. Además, el modelo estocástico proporciona la base fundamental sobre la cual las observaciones y los resultados estimados se analizan y evalúan para identificar observaciones de mala calidad y la fiabilidad del levantamiento. Para los fines esbozados anteriormente, un modelo estocástico *fiable* es la piedra angular para estimaciones y evaluaciones *fiabiles* por mínimos cuadrados.

Estimación y ajuste

En una solución bien diseñada, el número de observaciones (n) es superior al número de parámetros desconocidos (u) y como tal, existirá redundancia. Esto es, los grados de libertad ($r = n - u$) serán mayores que cero. En cualquier solución donde hay redundancia, las incoherencias en el modelo funcional surgirán inevitablemente debido a la presencia de errores en las observaciones. En consecuencia, existirá un número de valores posibles para los parámetros.

El propósito de los mínimos cuadrados, por lo tanto, es llegar a valores únicos de los parámetros mediante la estimación de correcciones (o ajustes) para cada medición, de forma que los modelos funcional y estocástico se satisfagan. En forma matricial, la solución de mínimos cuadrados intenta obtener los valores más probables de los parámetros $\hat{\mathbf{x}}$ satisfaciendo lo siguiente:

$$\mathbf{m} + \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$$

Aquí, $\hat{\mathbf{v}}$ denota las correcciones a las observaciones. El algoritmo de mínimos cuadrados selecciona los valores para $\hat{\mathbf{v}}$ de manera que los parámetros desconocidos $\hat{\mathbf{x}}$ tendrán máxima probabilidad. Esto se satisface por la siguiente condición:

$$w = \mathbf{v}^T \mathbf{V}_m^{-1} \mathbf{v} \rightarrow \text{mínimo}$$

Esta cantidad representa la suma ponderada de los cuadrados de las correcciones a las observaciones originales, de la cual se deriva el nombre de mínimos cuadrados. Al minimizar w , el algoritmo para la solución de parámetros desconocidos $\hat{\mathbf{x}}$ partiendo de un conjunto de observaciones \mathbf{m} y las varianzas observadas \mathbf{v}_m puede escribirse como:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}_m^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{V}_m^{-1} \mathbf{m}$$

$$\mathbf{v}_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}_m^{-1} \mathbf{A})^{-1}$$

Donde \mathbf{A} es una matriz de diseño linealizada que representa el modelo funcional y $\mathbf{v}_{\hat{\mathbf{x}}}$ es la matriz de varianza rigurosa para los parámetros estimados.

La información contenida en $\mathbf{v}_{\hat{\mathbf{x}}}$ es esencial para comprender el comportamiento espacial de la incertidumbre en el marco de referencia. También proporciona una base rigurosa para la propagación de la incertidumbre en todas las otras formas de información espacial alineadas con un marco en particular y los medios para realizar diferentes inferencias acerca de la calidad absoluta y relativa de características geográficas.

Referencias

Cooper, M. (1974). *Control Surveys in Civil Engineering*. Collins professional and technical books, Londres.

Mikhail, E. (1976). *Observations and Least Squares*. IEP, Dun-Donnelley, Nueva York.

9 MEDIDAS DE EVALUACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR MÍNIMOS CUADRADOS

Roger Fraser

Servicio geodésico, Victoria, Australia
roger.fraser@dtpli.vic.gov.au

La sección "Estimación de parámetros del marco de referencia mediante la técnica de mínimos cuadrados" presentó una visión general del tema. Esta sección revisa brevemente algunos conceptos básicos y técnicas para la evaluación de observaciones geodésicas y de estimación de parámetros por mínimos cuadrados, así como para estimar la fiabilidad de la red.

Introducción

El propósito principal de la estimación de mínimos cuadrados es resolver un conjunto de parámetros desconocidos a partir de un conjunto de observaciones. De forma secundaria, aunque igualmente importante, el propósito de los mínimos cuadrados es proporcionar una base para la validación de la *calidad* y la *fiabilidad* del sistema. En el contexto de marco de referencia de la geodesia, la validación de mínimos cuadrados implica pruebas (1) sobre la calidad de las observaciones y sus precisiones *a priori*, y (2) la calidad de la solución de mínimos cuadrados en su conjunto. Una tarea de validación adicional serían las pruebas de fiabilidad, en las que las observaciones y la red geodésica se someten a revisión de fiabilidad *interna* y *externa*.

Las razones para las pruebas son bien conocidas. En primer lugar, la precisión supuesta de un dato único o conjunto de observaciones puede no ser una indicación realista de la verdadera calidad de la medición. En segundo lugar, las observaciones continuas y repetidas de estaciones GNSS CORS y las campañas de medición pueden indicar que una o más estaciones se han movido y como consecuencia, las mediciones más antiguas ya no representan el mundo real. En este caso surgirán incoherencias en la solución y posteriormente será necesario un medio para detectar valores atípicos de observaciones. En tercer lugar, es posible que se haya obtenido una medición errónea o que incumpla un estándar. Si no se detectan y corrigen los efectos de cualquiera de estos factores, pueden darse declaraciones incorrectas sobre la calidad y la fiabilidad de una solución de mínimos cuadrados y de los parámetros estimados.

Análisis y prueba de resultados

Recuerde que el algoritmo de mínimos cuadrados selecciona los valores de las correcciones a las observaciones \hat{v} de manera que los parámetros desconocidos \hat{x} tendrán máxima probabilidad. Esto se logra a través de la siguiente condición:

$$w = v^T V_m^{-1} v \rightarrow \text{mínimo}$$

Para validar la fiabilidad de la solución de mínimos cuadrados como un todo, w debe evaluarse para ver si es estadísticamente diferente a los grados de libertad (r). Esta prueba se conoce como la *prueba global* o la *prueba de bondad de ajuste*.

Para la prueba global, w se somete a la prueba χ^2 de límite superior sobre una cola única para un determinado nivel de confianza (α):

$$P[w > \chi_{r,\alpha}^2] > \alpha$$

Si bien es teóricamente posible realizar la prueba a w en cualquier nivel de confianza, la prueba suele efectuarse con un nivel de confianza del 95 %.

De la igualdad entre w y r se infiere que la solución es estadísticamente fiable. Cuando w es significativamente mayor que r , en cuyo caso w excede el límite superior de confianza, entonces se infiere que la solución ha fallado. Las razones del fracaso se pueden atribuir a una o varias causas, como errores u observaciones de valores atípicos, un modelo estocástico incorrecto (por ejemplo, matriz de varianzas demasiado optimista) o una deficiencia en el modelo funcional (por ejemplo, dos o más observaciones GNSS en diferentes marcos de referencia y/o épocas).

Para ayudar en la identificación de errores atípicos, matrices de varianzas subóptimas y causas de soluciones inconsistentes, debe emplearse una *prueba local*. Para esta prueba se pueden usar dos distribuciones. En primer lugar, si la matriz de varianzas *a priori* V_m se sabe que es fiable, la magnitud de las correcciones v_1, v_2, \dots, v_n deben evaluarse respecto a la distribución normal a un intervalo de confianza (α):

$$\frac{v_i^2}{\sigma_i^2} > N(0, \alpha)$$

En segundo lugar, si V_m se considera poco fiable, la magnitud de las correcciones debe validarse mediante la distribución t de Student:

$$\frac{v_i^2}{\sigma_i^2} > t(1, \alpha)$$

En cualquier caso, si la medición m_i es un error, error atípico o el resultado de un error durante la reducción y la etapa de procesamiento, v_i será tan grande que esta cantidad será superior a los límites superior e inferior del intervalo de confianza especificado α y, por lo tanto, fallará la prueba local. De lo contrario, si la varianzas de las observaciones especificada es demasiado grande o demasiado pequeña, esta cantidad también fallará esta prueba.

Fiabilidad de una red geodésica

Existen varios indicadores estadísticos para medir la fiabilidad de una red geodésica (Proszynski, 1994). Un indicador simple, pero útil, de fiabilidad interna es el indicador de Pelzer (1979), que puede utilizarse para cuantificar la fiabilidad de observaciones individuales y toda la red.

El indicador de fiabilidad local de Pelzer está dado por:

$$\tau = \frac{\sigma_m}{\sigma_v} = \frac{\sigma_m}{\sqrt{\sigma_m^2 - \sigma_a^2}}$$

donde σ_m es la precisión *a priori* de las observaciones y σ_v es la precisión de las correcciones por mínimos cuadrados determinadas a partir de la primera y de la precisión de las observaciones ajustadas (σ_a). La cantidad τ va desde la unidad hasta infinito. Una buena fiabilidad interna se logra cuando τ se aproxima a la unidad o cuando σ_v se

asemeja a τ_m . Por el contrario, de grandes valores de τ se infiere una escasa fiabilidad.

El indicador global de fiabilidad Pelzer viene dado por:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tau_i^2 - 1)$$

donde n es el número de observaciones y τ_i es el indicador local de Pelzer. Esta cantidad varía desde cero hasta infinito y proporciona una base para valorar la fiabilidad de la red como un todo.

Un procedimiento de estimación general y evaluación

El procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados para el establecimiento de marcos de referencia internacionales está más allá del alcance de esta ficha técnica. Sin embargo, para los propósitos de la propagación regional, nacional o local del marco de referencia a otras estaciones, pueden adoptarse los pasos siguientes:

1. Corregir todas las observaciones geodésicas para todas las fuentes de error sistemático conocidas.
2. Verificar que las varianzas observadas *a priori* (V_m) sean cantidades realistas.
3. Garantizar que se haya obtenido un número suficiente de observaciones redundantes con el fin de proporcionar un nivel adecuado de fiabilidad.
4. Llevar a cabo un ajuste mínimamente restringido (es decir, un número mínimo de coordenadas se restringen lo suficiente para calcular todas las dimensiones del marco de referencia).
5. Examinar el ajuste mínimamente restringido mediante la prueba local y la prueba global.
Cuantificar la fiabilidad interna local y global.
6. Llevar a cabo un ajuste restringido mediante la introducción de todas las posiciones e incertidumbres de estaciones necesarias en el marco de referencia.
7. Efectuar pruebas al ajuste restringido usando las pruebas local y global para verificar que las restricciones impuestas no dan lugar a fallo(s) de observaciones. Cuantificar la fiabilidad interna local y global. Realizar otras evaluaciones de confiabilidad según sea necesario.

En los pasos 5) y 7), las respectivas pruebas globales deberían confirmar que w es menor que el límite superior del intervalo de confianza deseado. Del mismo modo, las respectivas pruebas locales deberían confirmar que las correcciones a las observaciones están dentro de los límites superior e inferior del intervalo de confianza deseado. Las pruebas locales deben efectuarse siempre con independencia de los resultados de la prueba global, ya que es muy posible que se den fallos en las mediciones incluso cuando la solución supere la prueba global.

Si se dan fallos, ya sea del ajuste mínimamente restringido o restringido, deberían examinarse la matriz de varianza de las observaciones y cualquier restricción impuesta sobre la estación para identificar y corregir la causa del fallo.

Referencias

Cooper, M. (1974). *Control Surveys in Civil Engineering*. Collins Professional and Technical Books, Londres.

- Mikhail, E. (1976). *Observations and Least Squares*. IEP, Dun-Donnelley, Nueva York.
- Pelzer, H. (1979). *Criteria for the reliability of geodetic networks. Optimisation of Design and Computation of Control Networks* (editores F. Halmos y J. Somogyi). Budapest: Akademiai Kiado, pp. 553–562.
- Proszynski, W. (1994). *Criteria for internal reliability of linear least squares models*. Bulletin Geodesique, vol. 68, pp. 162–167.

10 SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Chris Rizos

Universidad de Nueva Gales del Sur, Australia

c.rizos@unsw.edu.au

Los topógrafos están utilizando cada vez más los sistemas de posicionamiento basados en satélites para hacer sus levantamientos. Un número de sistemas están ahora completa o parcialmente operacionales y varios están desarrollando sistemas de aumentación regionales. Esta sección proporciona una visión general de los diversos sistemas disponibles y los métodos para realizar levantamientos.

Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el GNSS más conocido. “Multi-GNSS” ahora se entiende también como otros GNSS operativos (GLONASS de Rusia); algunos GNSS se encuentran en diversas etapas de implementación, como Galileo de la Unión Europea y BeiDou de China, y los sistemas satelitales regionales o de aumentación como el Sistema Cuasi Cenital Satelital de Japón (QZSS), el Sistema Regional de Navegación por Satélite Hindú (IRNSS) y otros sistemas de aumento espaciales (Fig. 1).

Desde la década de 1980, el GPS ha revolucionado las disciplinas de la geodesia y la topografía, y posteriormente ha tenido un impacto considerable en todas las comunidades de navegación conforme ha mejorado la disponibilidad de las señales satelitales y los equipos de recepción de los usuarios.

En el nivel más básico, el modo o técnica de posicionamiento del GPS, y de hecho de cualquier GNSS, se clasifica en función de si proporciona resultados de posicionamiento absoluto o relativo. Sin embargo, todos requieren información proporcionada por la infraestructura terrestre.

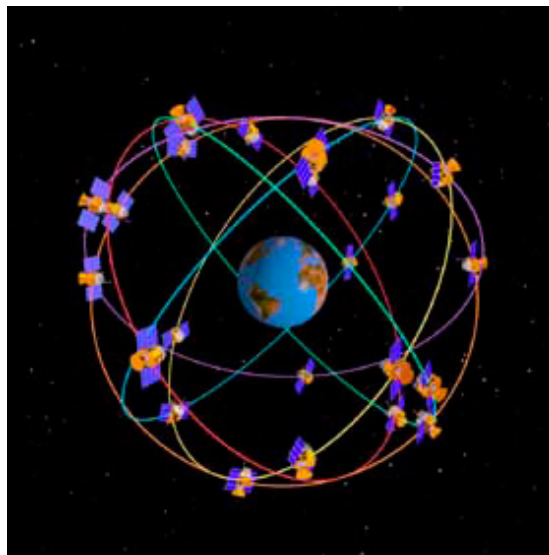


Figura 1: Representación esquemática del sistema GNSS y los satélites.

CORS y modos de posicionamiento

La infraestructura terrestre hoy se entiende como los muchos cientos (si no miles) de Estaciones de Referencia de Funcionamiento Continuo (CORS). Como su nombre lo indica, son receptores GNSS (idénticos al equipo del usuario para topografía) que se emplean de manera estática sobre estaciones bien establecidas. El nivel más alto para una CORS es el de una red de estaciones que contribuyen al Servicio Internacional de los GNSS (IGS) y, en efecto, forman parte de la infraestructura física del Sistema de Observación Geodésica Mundial (GGOS). Tales estaciones CORS tienen monumentos muy estables y operan de forma continua durante muchos años. Estas contribuyen al ITRF y a productos de alto nivel de órbitas de satélites y relojes para facilitar técnicas como el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) (Fig. 2).

Otras CORS las operan organismos científicos, departamentos gubernamentales (federales, estatales y locales), empresas privadas, instituciones académicas e incluso particulares. De hecho, en todos los casos (excepto para el modo estándar de posicionamiento GNSS puntual absoluto), las observaciones de las CORS son necesarias para la mejora de la precisión de posicionamiento GNSS.

El **Posicionamiento Puntual Absoluto (SPP)** es el modo operativo para el que se diseñó originalmente el GPS basado en observaciones comparativamente de baja calidad de código o de pseudorange. Los receptores civiles estándar ofrecen actualmente en tiempo real un rendimiento en la precisión absoluta horizontal del orden de 5 a 10 m en el marco de referencia WGS84. La precisión vertical es típicamente 2–3 veces peor que la precisión horizontal.

El **GPS Diferencial (DGPS)** puede superar algunas de las limitaciones del SPP mediante la aplicación correspondiente de correcciones a las medidas básicas de pseudodistancia en el receptor de usuario para atenuar o eliminar algunos de los sesgos más graves



Figura 2: Estación CORS típica.

del sistema satelital y atmosféricos, a partir de un segundo receptor como estación de referencia que hace mediciones similares en un punto conocido. La precisión de la posición relativa alcanzable puede variar de un metro a unos pocos decímetros, dependiendo de la calidad de los receptores, la distancia entre el receptor del usuario y el de referencia que genera los datos de corrección, la técnica de DGPS particular y tal vez el servicio de corrección DGPS empleado.

El **GPS relativo** se refiere a la técnica de posicionamiento más precisa, que utiliza los principios DGPS con una o más estaciones de referencia con respecto a las cuales las coordenadas del receptor se calculan a partir de observaciones de fase en lugar de código (pseudorange) más ruidosas.

La **cinemática en tiempo real (RTK)** es una técnica de posicionamiento relativo que puede alcanzar precisión centimétrica en tiempo real mediante pares de receptores, incluso si el receptor del usuario es móvil, es decir, cinemático. Están aseguradas eficiencias operativas y de alta precisión cuando se registran tanto observaciones de código como de fase en varias frecuencias de transmisión. Por lo tanto, los receptores capaces de usar RTK son caros en comparación con receptores de una sola frecuencia SPP/DGPS, pues requieren instrumentos de doble frecuencia y algoritmos especializados de procesamiento de líneas base.

El **posicionamiento puntual preciso (PPP)** es una técnica de procesamiento que aplica información muy precisa de la órbita del satélite y del reloj de GPS, calculados por separado desde redes globales CORS para receptores geodésicos de alta calidad a través de algoritmos de procesamiento específicos, con el fin de producir coordenadas con una incertidumbre de decímetro a centímetros sin restricción alguna de la línea base. Las coordenadas se calculan en el datum de los productos de la órbita de los satélites y el reloj, típicamente IGS08. Algunos modos PPP utilizan redes CORS locales y son en efecto técnicas de posicionamiento relativo.

Multi-GNSS

Para el año 2020 se espera que el número de señales de satélites de navegación GNSS se duplique a partir del número actual de menos de 70 satélites a más de 140 satélites. Los satélites y las señales adicionales pueden mejorar la precisión, por lo tanto:

- Con más satélites observados, se puede lograr más rápidamente un nivel dado de precisión.
- Más señales significan que pueden procesarse más observaciones.
- La precisión de la posición es menos susceptible a la influencia de la geometría de los satélites.
- La precisión vertical se acercaría al desempeño del posicionamiento horizontal.
- Los efectos de trayectoria múltiple e interferencia/bloqueo podrían mitigarse a través de algoritmos de selección de señal del satélite, como la implementación de la supervisión autónoma de la integridad del receptor (RAIM).

Unos satélites y unas señales adicionales pueden mejorar la eficiencia. Para un posicionamiento de precisión centimétrica basado en la fase, unos satélites y unas señales adicionales reducirán significativamente el tiempo requerido para resolver ambigüedades de la fase portadora. Unos satélites y unas señales adicionales pueden mejorar la

disponibilidad de la señal en un lugar determinado, algo crucial para las soluciones de los usuarios en zonas que no satisfacen las condiciones de cielo abierto.

Unos satélites y unas señales adicionales pueden mejorar la fiabilidad de las siguientes maneras:

- Las observaciones adicionales aumentan la redundancia de datos, lo que ayuda a identificar observaciones dudosas.
- La operación de doble frecuencia se verá reforzada en el futuro con señales de mayor calidad.
- Más señales significan que el servicio no se niega con tanta facilidad debido a la interferencia o al bloqueo intencional de una frecuencia o conjunto de señales.

Más información

- IGS: Servicio Internacional de los GNSS
<http://www.igs.org>
- Información del gobierno de Estados Unidos sobre temas GPS y afines
<http://www.gps.gov/>
- Agencia Espacial Europea: Galileo
http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo
- ¿Qué es BeiDou?
<http://en.beidou.gov.cn/>
- Información del Centro Analítico GLONASS
<http://www.glonass-center.ru/en/index.php>
- Sistema Regional de Navegación por Satélite Hindú (IRNSS)-1
<http://dos.gov.in/satellites.aspx>

11 REDES GNSS CORS Y LA VINCULACIÓN AL ITRF

Rob Sarib

Oficina del geómetra general, Territorio del norte, Australia
robert.sarib@nt.gov.au

Mikael Lilje

Departamento de Geodesia, Lantmäteriet, Suecia
mikael.lilje@lm.se

Cada vez más países están construyendo redes de Estaciones de Referencia GNSS de Funcionamiento Continuo (CORS) que proporcionan servicios al topógrafo para aumentar la eficiencia para efectuar levantamientos geodésicos. Pueden generarse posiciones en tiempo real en términos del marco de referencia local o global si es necesario. En esta sección se detalla la forma de vincular información de una CORS a marcos de referencia globales.

Cómo vincular una CORS al ITRF

El procesamiento de líneas de base de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), ya sea en el modo de posprocesamiento o de tiempo real, resuelve una línea base entre una referencia conocida y una posición desconocida del equipo móvil. El cálculo de línea de base se realiza a menudo en un marco de referencia matemáticamente vinculado al sistema de coordenadas del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) o el "Sistema Geodésico Mundial 1984" (WGS-84). En cualquier situación, las coordenadas del receptor móvil se determinan con relación a las coordenadas de la referencia. Cualquier transformación a coordenadas locales (o datum geodésico) se genera posteriormente.

Para el procesamiento eficaz de la línea de base, las coordenadas de la posición de referencia deben conocerse con precisión. Dado que el propósito fundamental de las estaciones de referencia GNSS o Estaciones de Referencia de Funcionamiento Continuo (CORS) es proporcionar el marco geoespacial para determinar las posiciones de los receptores móviles, se deduce que las coordenadas precisas son necesarias para tales estaciones de referencia. Para facilitar esta necesidad, hay una red global de más de 400 estaciones IGS (Servicio Internacional de los GNSS), cuyas coordenadas están expresadas en términos del ITRF.

Por simplicidad podría suponerse que las coordenadas WGS84 recientemente derivadas de estaciones de referencia son coordenadas ITRF, dado que el sistema de referencia WGS es muy similar al ITRF en su especificación. De hecho, la última alineación y versión con ITRF se produjo el 8 de febrero de 2012 y se conoce como WGS84 (G1674).

Muchos países ya cuentan con una red nacional de GNSS CORS. Este tipo de redes normalmente se han conectado a la red IGS y, por lo tanto, las estaciones tendrán coordenadas ITRF precisas. Al establecer una nueva estación de referencia independiente o una red de estaciones, es preferible conectar la nueva estación o red a la red nacional. Por tanto, es recomendable contactar con la organización nacional de levantamientos geodésicos para obtener datos de la red CORS nacional. Si no hay ninguna red nacional adecuada, entonces la alternativa es conectar la nueva estación o red a la red IGS. Para obtener información general de la red IGS y cómo obtener los archivos de datos RINEX consulte la sección "Más información".

Para determinar las coordenadas ITRF de una nueva estación de referencia o de una red, se sugiere lo siguiente:

- Seleccionar una estación de la nueva red como la “maestra”.
- En la estación maestra registrar datos (es suficiente 30 segundos o 1 minuto de intervalo de registro) durante al menos 24 horas, y preferentemente hasta 7 días.
- Descargar datos RINEX de la estación IGS más cercana o que esté disponible desde la estación nacional más cercana.
- Procesar la línea de base a partir de la estación IGS, o de la estación nacional, a la maestra durante las 24 horas de datos. Hay servicios en línea, como AUSPOS, que procesarán los datos. Si los datos se han registrado para varios días, realizar el proceso de la línea de base para cada 24 horas y determinar la media.
- Si es posible, procesar líneas de base desde la maestra a un adicional de una o dos estaciones IGS o estaciones nacionales, y determinar la media.
- Esto proporcionará coordenadas ITRF precisas para la estación maestra y vinculada a la red IGS o nacional.

Las coordenadas ITRF de las estaciones de la nueva red tienen que ser fiduciarmente exactas. Es decir, la red tiene que tener un grado muy alto de precisión entre las estaciones. Para lograr esto, se recomienda el siguiente procedimiento:

- Todas las estaciones deben registrar datos (es suficiente 30 segundos o 1 minuto de intervalo de registro) durante al menos 24 horas, y preferentemente durante varios días.
- Utilizar las coordenadas ITRF de la estación maestra como punto de partida, procesar todas las líneas de base de la red con 24 horas de datos. Posiblemente repetir por un periodo o dos más de 24 horas. Ajustar la red si se cuenta con software de ajuste disponible.
- Esto proporcionará coordenadas ITRF para todas las estaciones. Las coordenadas tendrán un alto grado de exactitud relativa.

Nota: Si se utiliza cinemática en tiempo real (RTK) o GNSS diferencial para determinar las coordenadas de nuevos puntos, entonces la posición resultante normalmente se basa en el marco de referencia de las estaciones de referencia que transmiten las correcciones en tiempo real.

En una red GNSS CORS, el topógrafo normalmente derivará una altura sobre la base del elipsoide de referencia, por ejemplo del Sistema de Referencia Geodésico 1980 (GRS80). Sin embargo, la mayoría de los usuarios trabajan con alturas “físicas” basadas en un datum de altura local (como el nivel medio del mar local) y, por lo tanto, necesitan relacionar la altura elipsoidal derivada a esta referencia de altura local. Esto se logra mediante el uso de un modelo de geoide para el área de levantamiento.

Servicios GNSS de procesamiento en línea

Para las situaciones en las que no existen redes basadas en ITRF y el software de procesamiento no está disponible o no es adecuado, hay servicios de procesamiento en línea por internet que derivan coordenadas ITRF si se cuenta con suficientes datos RINEX.

Estos sistemas proporcionarán una solución de posición según el sistema de coordenadas del ITRF mediante el cálculo de líneas de base desde estaciones de referencia GNSS cercanas y de posición conocida en ITRF. Estas estaciones de referencia podrían estar en otro país y/o sitios del IGS.

Consulte las siguientes webs para obtener más información sobre servicios de procesamiento GNSS en línea y sus requisitos:

- Auto Gipsy (JPL): servicio proporcionado por JPL
<http://apps.gdgps.net/>
- AUSPOS (Geoscience Australia): servicio proporcionado por Geociencias Australia
<http://www.ga.gov.au/geodesy/sgc/wwwgps/>
- OPUS: servicio proporcionado por NGS, EE. UU.
<http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>
- SCOUT (SOPAC): servicio proporcionado por SOPAC, EE. UU.
<http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>
- CSRS-PPP (NRCAN GSD): servicio proporcionado por Recursos Naturales, Canadá
http://www.geod.nrcan.gc.ca/ppp_e.php

Más información

Las siguientes webs le proporcionarán más información sobre este tema:

- UNAVCO (para la herramienta TEQC)
<http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/geodetic-utilities.html>
- IGS (Servicio Internacional de los GNSS)
<http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Para obtener información sobre la red IGS:

- EUREF (datos RINEX)
<http://www.epncb.oma.be/>
- SOPAC (información sobre los archivos de datos RINEX y IGS)
<http://sopac.ucsd.edu/index.shtml>
- NGS (para obtener información sobre RINEX)
<http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>
- RINEX (formato de intercambio independiente del receptor)
<http://www.aiubdownload.unibe.ch/rinex/rinex300.pdf>
- Marco de Referencia Terrestre Internacional ITRF
<http://itrf.ensg.ign.fr/>

La información de esta ficha técnica se obtuvo de "GPS Reference Stations and Networks – An Introductory Guide" – Leica Geosystems, Suiza 2005.

12 EL SERVICIO INTERNACIONAL DE LOS GNSS (IGS)

Nic Donnelly

Información del territorio de Nueva Zelanda, Nueva Zelanda

ndonnelly@linz.govt.nz

Muchos de los paquetes de software GNSS disponibles en el mercado tienen opciones que permiten al topógrafo descargar y utilizar los datos y productos del IGS en su procesamiento. Esto permite la generación de coordenadas precisas alineadas con la última versión del ITRF, que a continuación pueden transformarse a un sistema de coordenadas local si se desea. En esta sección se detalla la estructura del IGS y los servicios que prestan.

Introducción



El Servicio Internacional de los GNSS (IGS), anteriormente el Servicio Internacional de GPS, es una federación voluntaria de más de 200 agencias de todo el mundo que comparten recursos y datos de estaciones permanentes GPS & GLONASS para generar productos GPS & GLONASS precisos. El IGS se compromete a proporcionar datos y productos de mayor calidad como el estándar para los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) en apoyo de la investigación en ciencias de la Tierra, aplicaciones multidisciplinarias y educación. Actualmente el IGS incluye dos GNSS, GPS y GLONASS y pretende incorporar futuros GNSS (como GALILEO, BEIDOU).

El servicio ofrece productos y datos de libre disponibilidad para las comunidades científicas y topográficas. Es un servicio de la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) y es un esfuerzo colaborativo entre decenas de científicos, académicos y organizaciones gubernamentales. Con los datos y productos del IGS pueden efectuarse levantamientos de alta precisión en grandes áreas en términos del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

Formación

Los levantamientos GNSS de alta precisión suelen implicar el posicionamiento relativo para conectar una estación nueva a una existente que tiene coordenadas relativas al marco de referencia deseado. Para estudios de naturaleza regional o global, vincularse al marco de referencia internacional es muy deseable. A finales de 1980 y principios de 1990, asegurar las observaciones GNSS simultáneas apropiadas para conectarse al marco de referencia internacional era un desafío logístico destacable. Las marcas geodésicas relevantes eran a menudo distantes y suponía un reto acceder a ellas y podría ser difícil obtener datos de otras agencias que efectúan observaciones GNSS al mismo tiempo que la campaña de medición. El procesamiento de datos para alcanzar los más altos niveles de precisión también suponía un reto. Por ejemplo, la mayoría de los usuarios no tenían la capacidad de calcular sus propias órbitas de alta precisión.

Era evidente que la comunidad topográfica internacional obtendría un gran beneficio de un acceso más fácil a los datos GNSS y a los productos de datos comúnmente uti-

lizados para procesarlos. El uso de un conjunto estandarizado de datos y productos también aseguraría que el posicionamiento podría llevarse a cabo coherentemente en todo el mundo, una cuestión de gran importancia en muchas aplicaciones científicas y de topografía. Así, en 1994, el IGS inició sus actividades como un servicio de la AIG. Se le llamó inicialmente el Servicio Internacional de GPS, pero pasó a llamarse después el Servicio Internacional de los GNSS para reflejar la aparición de GLONASS y otras constelaciones satelitales GNSS.

Estructura

Hay cinco componentes operacionales principales del IGS: proveedores de datos, centros de datos, centros de análisis, grupos de trabajo y la oficina central. Estos se describen en la tabla siguiente:

Componente	Descripción
Proveedor de datos	Maneja una estación GNSS y proporciona los datos a un centro de datos IGS. Los operadores de estaciones geodésicas son normalmente las agencias nacionales geodésicas o instituciones de investigación geodésica.
Centro de datos	Almacena los datos GNSS y productos de IGS para su puesta a disposición a la comunidad de posicionamientos geodésicos.
Centro de análisis	Genera los productos del IGS. Las contribuciones de cada centro de análisis las combina el coordinador de centros de análisis para generar los productos oficiales IGS.
Grupo de trabajo	Trabaja en un área de interés particular para el IGS. Por ejemplo, productos de antenas, ionosfera y troposfera, marcos de referencia y reloj.
Oficina central	Coordina todas las actividades del IGS.

Datos y productos

Los datos primarios proporcionados por el IGS son observaciones de fase y código del GPS y GLONASS (donde corresponda) en forma de archivos RINEX para cada una de las estaciones que forman la red IGS. Entre otros datos se incluyen las efemérides transmitidas (órbitas) para GPS y GLONASS y de estaciones con información meteorológica. Los datos actualizados de las estaciones están disponibles diariamente.

Los productos de IGS se derivan de los datos, como efemérides precisas, correcciones de reloj satélite/receptor, parámetros de rotación de la Tierra (ERP), parámetros atmosféricos, coordenadas y velocidades de estaciones. Los productos están disponibles en varias latencias para reflejar los requisitos de las diferentes aplicaciones. Los productos ultrarrápidos están disponibles en tiempo casi real, pero son los menos precisos. Los productos rápidos se proporcionan de uno a dos días y tienen una mayor precisión. Los productos finales proporcionan la mejor precisión y están disponibles de diez días a cuatro semanas (dependiendo del producto).

El IGS también proporciona datos de calibración de la antena para las antenas de su red y registros con metadatos de información de la estación.

La alineación con el ITRF

El IGS proporciona las coordenadas GPS, las velocidades y los ERP que contribuyen al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). Los GNSS tienen un papel importante, pues proporcionan conexiones entre las otras técnicas de geodesia espacial (VLBI, SLR y DORIS). También ayudan a mantener la orientación del ITRF.

El IGS también calcula su propia versión del ITRF, que es el marco de referencia en el que se expresan sus productos. Puede haber pequeñas diferencias en coordenadas entre el ITRF y el marco del IGS debido a factores específicos de la estación, como el uso de mejores modelos de antena en la versión del IGS. La transformación entre la versión del ITRF y la correspondiente del IGS es cero.

Cada versión del IGS tiene como referencia un año relativo al ITRF en el que se basa. Las diversas versiones del IGS de la misma solución ITRF se identifican añadiendo o aumentando una letra. Por ejemplo, la versión del IGS de ITRF2008 es IGS08, mientras que la versión actualizada del IGS de ITRF2008 es IGS08.

Más información

Altamimi Z., Collilieux X., y Métivier L., (2011) ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, *Journal of Geodesy*, vol. 85, pp. 457–473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4

Dow, J M, Neilan R N, y Rizos, C, (2009) The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy* vol. 83, pp. 191–198, doi:10.1007/s00190-008-0300-3

Kouba, J (2009) *A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products*. Disponible en línea <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>. Acceso el 7 de agosto de 2013.

IGS (2013) *International GNSS Service (formerly the International GPS Service)*. Disponible en línea <http://www.igs.org/>. Acceso el 7 de agosto de 2013.

13-1 ESTÁNDARES Y CALIDAD DE LOS MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRE

David Martin

Laboratorio europeo de radiación sincrotrón, Francia
martin@esrf.fr

Como profesionales, los topógrafos deben cumplir con ciertos requisitos legales, reglamentarios y/o de precisión para sus clientes. Por lo general, se esforzarán en hacerlo de manera rentable óptima y con el equipo adecuado para el trabajo. Naturalmente, para esto es necesario comprender bien y confiar en los instrumentos empleados. Los clientes quieren el máximo beneficio por lo que pagan. Las autoridades legislativas, así como empresas privadas y públicas, requieren confiar en que los servicios prestados estén en conformidad con reglas de las mejores prácticas internacionales. Emplear normas reconocidas internacionalmente como la serie ISO y garantizar la trazabilidad en observaciones son dos métodos aceptados amplia e internacionalmente.

Calidad y estándares

Las organizaciones se crean para satisfacer una necesidad social y tienen éxito cuando satisfacen las necesidades, requisitos y expectativas de sus partes interesadas. ¿Cuáles son estas partes interesadas? Por ejemplo, las personas u organizaciones con la libertad para proporcionar o retirar algo de una empresa. Incluyen el gobierno, proveedores, sociedad, empleados, clientes, etc.

El cliente es un grupo de interés especial: es la persona u organización que recibe un producto o servicio, es decir, el que paga, con lo que solo él puede decidir si los productos o servicios son satisfactorios. Los clientes necesitan productos y servicios de calidad entregados a tiempo y a un precio que refleje la relación calidad-precio.

¿Cuáles son las características de calidad? El producto de calidad es fiable, funcional, duradero, seguro, disponible y localizable. Los servicios de calidad reflejan la competencia, capacidad de respuesta, integridad, fiabilidad y credibilidad. La calidad es el grado en que un conjunto de características inherentes cumplen una serie de requisitos, y un requisito es una necesidad o expectativa que se establece, generalmente de forma implícita u obligatoria.

Una forma generalmente aceptada de asegurar la calidad es mediante normas de gestión de la calidad reconocidas. Estas normas proporcionan un punto de referencia para los productos y servicios y un modelo de mejores prácticas para gestionar los procesos. Una norma es una regla o requisito que está determinada por una opinión de consenso de los usuarios. En ella se establece la aceptación y (teóricamente) los criterios óptimos de un producto, proceso, prueba o procedimiento. Los beneficios de una norma son la seguridad, la calidad, la intercambiabilidad de las piezas o sistemas y la coherencia internacional.

Los estándares han existido desde hace miles de años. Por ejemplo, la primera carretera de gran distancia en Europa la construyó el Imperio Romano para sus legiones. Los surcos creados por los carros romanos luego los utilizaron todos los demás carros. Más tarde, estos se convirtieron en un indicador para colocar las primeras líneas de ferrocarril.

La serie de la norma **ISO 9000** es el conjunto de normas más conocido para medir un sistema de gestión.

- ISO es el mayor desarrollador y editor de normas Internacionales,
- ISO es una red de institutos nacionales de normalización de 162 países,
- ISO es una organización no gubernamental que forma un puente entre los sectores público y privado,
- ISO permite un consenso sobre las soluciones para los negocios y la sociedad.

ISO 9000 es una familia de normas de sistemas de gestión de calidad diseñadas para ayudar a las organizaciones a garantizar que cumplen las necesidades de los clientes y otras partes interesadas. Representan un consenso internacional sobre las buenas prácticas de gestión de la calidad. La familia de normas ISO 9000 consta de:

- **ISO 9000** Fundamentos, vocabulario y servicios de los sistemas de gestión de calidad
- **ISO 9001** Requisitos de los sistemas de gestión de calidad
- **ISO 9004** Directrices sobre los sistemas de gestión de la calidad para la mejora del rendimiento
- **ISO 19011** Directrices sobre calidad y auditoría de los sistemas de gestión ambiental

La **ISO 9001:2008** presenta los requisitos de un sistema de gestión de calidad, independientemente de la actividad de la organización, su tamaño o si es del sector privado o público. Es el estándar ante el cual pueden certificarse las organizaciones.

Un sistema de gestión de la calidad proporciona el marco de los procesos y procedimientos utilizados para lograr objetivos. En el enfoque de procesos para sistemas de gestión de calidad recomendado por la ISO, un proceso es un conjunto de actividades interrelacionadas o que interactúan, y que transforman una entrada en resultados. Por su parte, un producto o servicio es el resultado de un proceso.

Trazabilidad, calibración y verificación

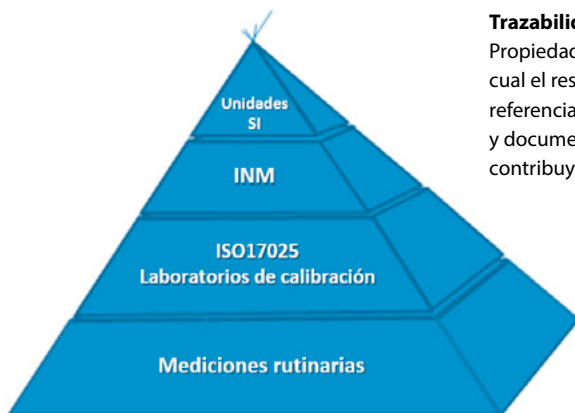
ISO 9001: 2008 7.6 El control de los equipos de seguimiento y medición estipula:

La organización debe determinar el seguimiento y medición necesaria para proporcionar prueba de conformidad con los requisitos del producto.

La organización debe establecer procesos para asegurarse de que el seguimiento y la medición se llevan a cabo coherentemente con los requisitos.

Cuando sea necesario garantizar la validez de los resultados, el equipo de medición deberá calibrarse o verificarse, o ambos, a intervalos especificados, o antes de su uso, con patrones de medición trazables a patrones de medición nacionales o internacionales.

La trazabilidad es uno de los pilares de la calibración instrumental y toda la metrología legal se basa en el concepto de trazabilidad. La trazabilidad es un método para asegurar que una medición es una representación exacta de lo que está tratando de medir. Asegura una cadena ininterrumpida de comparaciones que desemboca en un instituto nacional de metrología (INM) (Fig. 3).



Trazabilidad metrológica

Propiedad del **resultado medido** mediante el cual el resultado puede relacionarse con una referencia a través de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, y cada una contribuye a la **incertidumbre de la medición**.

Unidades SI

- longitud (metro)
- masa (kilogramo)
- tiempo (segundo)
- corriente eléctrica (amperio)
- temperatura termodinámica (Kelvin)
- cantidad de sustancia (mole)
- intensidad luminosa (candela)

Figura 1: Las cuatro partes que comprenden una medición.

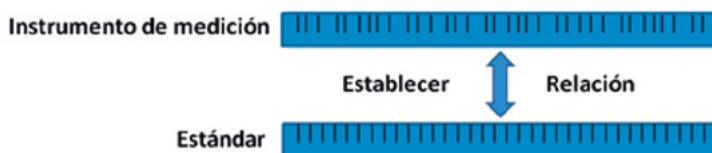


Figura 2: Relación entre una medición y un estándar..

Una medida comprende cuatro partes (Fig. 1): un valor, una unidad, una incertidumbre y un factor de cobertura k . Por ejemplo una distancia puede expresarse como 1,02345 m con una incertidumbre $U(D) = 0,0005$ m y un factor de cobertura $k = 2$. Para una variable distribuida normalmente (gaussiana), $k = 2$ representa una cobertura de 2σ o aproximadamente el 95 %.

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) define como calibración:

operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

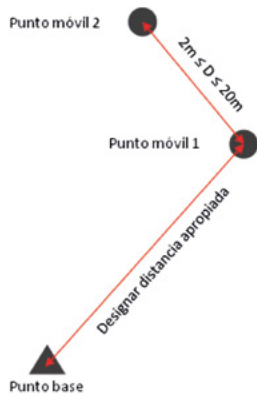
La incertidumbre de medida es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores cuantitativos atribuidos a una medida y sobre la base de la información utilizada (Figura 2). La incertidumbre de medida se compone de dos partes, incertidumbre *TipoA* y *TipoB*:

$$U = \sqrt{\text{TipoA}^2 + \text{TipoB}^2}$$

La incertidumbre *TipoA* es el resultado de las mediciones repetidas y es la incertidumbre con la cual estamos más familiarizados. La incertidumbre *TipoB* incluye valores de referencia, la experiencia, especificaciones del fabricante y certificados de calibración.

ISO 17123 Parte 8: Sistemas de medición GNSS en campo con cinemática en tiempo real (RTK)

Esta norma especifica los procedimientos de campo para evaluar la precisión (repetitividad) de observaciones en campo de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) realizadas en modo cinemática en tiempo real (GNSS RTK). Estas pruebas buscan ser verificaciones de campo de la aptitud de un instrumento para la aplicación en cuestión y/o para satisfacer los requisitos de otros estándares.



- Determinar las diferencias de distancias y altura entre los dos puntos móviles a una precisión de 3 mm o mejor.
- Hacer cinco juegos de coordenadas medidas x , y , h .
- La diferencia entre estas distancias medidas ε_D y alturas ε_h contra aquellas determinadas de forma independiente debe satisfacer:

$$\begin{cases} |\varepsilon_D| \leq 2,5 \times \sqrt{2} \times s_{xy} \\ |\varepsilon_h| \leq 2,5 \times \sqrt{2} \times s_h \end{cases}$$
 donde s_{xy} y s_h son incertidumbres *a priori*.
- Hay dos variantes de esta verificación: la prueba completa y la prueba simplificada

Figura 3: Ejemplo de trazabilidad.

13-2 ESTÁNDARES Y CALIDAD DE MARCOS DE REFERENCIA TERRESTRE

David Martin

Laboratorio europeo de radiación sincrotrón, Francia
martin@esrf.fr

La sección 13-1 ha proporcionado información sobre la calidad y las normas que se refieren a los marcos de referencia. Mientras tanto, en esta sección se ofrece un ejemplo y una lectura adicional sobre el tema.

Ejemplo

Los topógrafos en Malasia tienen la obligación legal de establecer trazabilidad en la medición, algo que se consigue en tres pasos. Las estaciones totales de referencia se calibran en un laboratorio certificado ISO17025 en el ESRF en Francia y esos instrumentos se utilizan para medir una serie de líneas de base en Malasia (Fig. 1). Los topógrafos comprueban sus instrumentos en estas líneas de base.

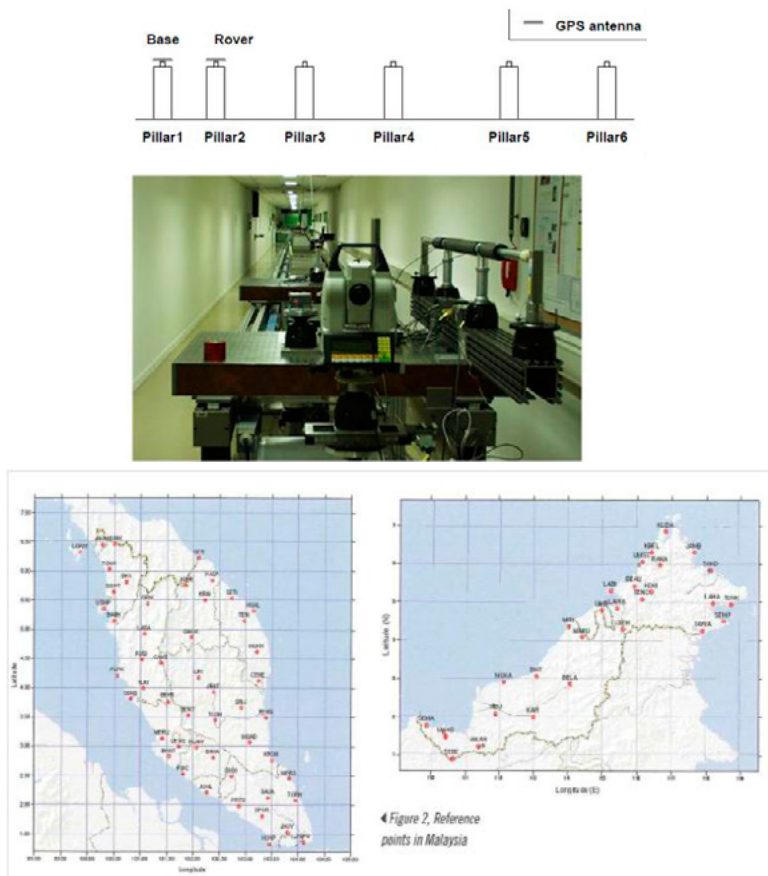


Figura 1: Ejemplo de trazabilidad en Malasia.

Más información

1. BIPM-IEC-IFCC-ISO-IUPAC-IUPAP-OIML, Ed. (1995). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva, International Organization for Standardization.
2. Hoyle, D. (2007). *Quality Management Essentials*, Butterworth-Heinemann.
3. ISO (2001–2007). ISO 17123 *Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments* Parts 1 to 8. Ginebra, Suiza, ISO. 17123.
4. ISO (2005). ISO/CEI 17025:2005 *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, International Organization for Standardization.
5. JCGM/WG2 (2007). JCGM 200:2008: *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, Joint Committee for Guides in Metrology.
6. Martin, D. (2007). GNSS CORS – Standards and Best Practices for GNSS and CORS (<http://www.fig.net/commission5/wg52/manuals.htm>).
7. Martin, D. (2007). GNSS CORS – Calibration and Testing for GNSS and CORS V3.2 (<http://www.fig.net/commission5/wg52/manuals.htm>).
8. Martin, D. (2008). *Review of Standards, Best Practice, Testing and Calibration in Global Navigation Satellite System (GNSS)*. FIG Working Week, Estocolmo, Suecia.
9. Martin, D. (2009). *GNSS CORS Calibration and Testing*. 7th FIG Regional Conference, Hanoi, Vietnam, FIG.
10. Ses, S., M. Kadir, et al. (1999). Potential use of GPS for cadastral surveys in Malaysia. *40th Aust. & 6th S.E.Asian Surveyors Congress*. Fremantle, Australia: 176–184.
11. Wübbena G., S. M., Mader G., Czopek F. (2007). *GPS Block II/IIA Satellite Antenna Testing using the Automated Absolute Field Calibration with Robot*. ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas, EE. UU.
12. Zeimetz, P. and H. Kuhlmann (2008). *On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber*. FIG Working Week 2008 Estocolmo, FIG.

SOBRE LOS AUTORES



Graeme Blick obtuvo su Licenciatura en Topografía en la Universidad de Otago en 1980. Trabajó para el entonces New Zealand Geological Survey (ahora GNS Science) en la sección de deformación de la Tierra usando técnicas geodésicas para medir, supervisar y estudiar la deformación de la corteza en Nueva Zelanda. A continuación, se pasó a Información del territorio Nueva Zelanda en 1995 como geodesta jefe de la Oficina nacional de Geodesia, donde continúa trabajando en el desarrollo e implementación del sistema geodésico en Nueva Zelanda, incluida la administración de su datum semidinámico. También es administrador de la Oficina nacional topográfica y grupo de desarrollo de negocios, donde supervisa mapas topográficos e imágenes para cartografía del departamento, así como nuevas iniciativas empresariales geoespaciales.



Chris Crook trabaja en la Oficina nacional de Geodesia de Información del territorio en Nueva Zelanda. Él es un líder técnico en la implementación del modelo de deformación en el Datum Geodésico de Nueva Zelanda 2000. Ha estado trabajando ampliamente en el desarrollo de procesos y herramientas geodésicas, incluido el componente de ajuste de levantamientos y de base de datos de Nueva Zelanda, Landonline. Antes de pasar a la Oficina nacional trabajó en estudios de deformación de la Tierra mediante levantamientos topográficos..



Nic Donnelly es topógrafo geodesta y trabaja en la Oficina nacional de Geodesia de Información del territorio en Nueva Zelanda. Entre sus responsabilidades se incluyen la asistencia con la recuperación del sistema geodésico después de terremotos significativos, el desarrollo de procedimientos para ajustes de mínimos cuadrados de los datos geodésicos y la gestión del datum semidinámico de Nueva Zelanda. Nic es representante en el Comité permanente Australia/Nueva Zelanda de Geodesia, es el enlace especial de ISO/TC 211 y miembro de la Comisión 5 de la FIG. En la actualidad también es estudiante de doctorado de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Nueva Gales del Sur, donde centra su investigación en el modelado de deformaciones y la incorporación de datos de radar de apertura sintética en el datum geodésico nacional.



Roger Fraser es encargado del servicio geodésico de la Oficina del geómetra general de Victoria dentro del Departamento de transporte, planificación e infraestructura local (Victoria, Australia). Sus principales intereses se encuentran en los campos de marcos de referencia en geodesia, el análisis preciso de GNSS y el desarrollo de algoritmos y software para el ajuste de grandes redes geodésicas.



Mikael Lilje es jefe del departamento de investigación geodésica de Lantmäteriet (autoridad sueca de cartografía, catastro y registro del territorio). Obtuvo su MSc con especialización en geodesia y fotogrametría del Instituto real de tecnología (Estocolmo, Suecia) en 1993. Trabaja en Lantmäteriet desde 1994, principalmente en el Departamento de Investigación Geodésica. Mikael fue presidente de la Comisión 5 de la FIG entre 2011–14 y ha trabajado en la FIG desde 1998.



David Martin es jefe del grupo de geodesia y alineación de la ESRF y cuenta con un MSc en Topografía de la Universidad College de Londres y un doctorado en Ingeniería de la Universidad de Warwick. Entre sus principales intereses se incluyen la alineación de acelerómetros, la estabilidad del terreno, los sistemas de nivelación hidrostática y las normas y la trazabilidad en la calibración del instrumento. Es presidente de la red de normas y del grupo de trabajo 5.1 de normas, garantía de calidad y calibración de la FIG.



Chris Rizos es profesor de Geodesia y Navegación en la Facultad de Ingeniería Civil y del medio Ambiente, de la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW), Sydney, Australia. Chris es presidente de la Asociación Internacional de Geodesia (AIG), miembro de la Junta Ejecutiva y del Consejo del Servicio Internacional de los GNSS (IGS), y copresidente del Comité Directivo de multi-GNSS de Asia. Chris es miembro de la AIG, miembro del Instituto australiano de navegación, miembro del Instituto estadounidense de navegación y profesor honorario de la Universidad de Wuhan, en China. Chris ha estado investigando la tecnología y la aplicación del GPS y otros sistemas de navegación/posicionamiento desde 1985 y es autor/coautor de más de 600 artículos en revistas y conferencias.



Daniel R. Roman es graduado de la Universidad Estatal de Ohio, tiene un MSc en Ciencias de la Ciencia Geodésica-Topográfica en 1993 y un doctorado en Geociencias lógicas (especializado en geofísica/gravedad y el magnetismo) en 1999. Después de graduarse, ingresó en el Servicio geodésico nacional como geodesta investigador. Es líder del equipo de modelización e investigación del geoide y su equipo ha desarrollado GEOID99, GEOID03, GEOID06, GEOID09, GEOID12A y sus modelos asociados. También es el investigador principal del proyecto de gravedad para redefinir el datum vertical americano (GRAV-D). El proyecto GRAV-D está estimado en 40 millones de USD y su intención es acceder a los GNSS de los modelos del geoide con determinación de alturas físicas precisas en centímetros. Los modelos se desarrollarán principalmente a partir de datos recolectados en el aire en todos los estados de EE. UU. y sus territorios, y mediante la colaboración con otros países de América del Norte, América Central y el Caribe. En la actualidad trabaja como director interino de la división de sistemas de referencia espacial en el NGS, donde es responsable de mantener el acceso a los aspectos geométricos del Sistema Nacional de Referencia espacial.



Rob Sarib es topógrafo supervisor de la Oficina del geómetra general, del Departamento gubernamental de planificación del territorio y del medioambiente del Territorio del norte. Rob obtuvo su título de licenciado en Ciencias aplicadas: Topografía y Cartografía de la Universidad Tecnológica de Curtin (Australia Occidental) en 1989 y también tiene un posgrado en Gestión del sector público de la Universidad Flinders de Australia del Sur. Obtuvo su licencia de topógrafo practicante en el Territorio del norte (Australia) en 1991. Desde entonces ha trabajado en el sector privado como topógrafo catastral y el gobierno del Territorio del norte volvió a contratarlo para gestionar el Sistema de Referencia Geoespacial del Territorio del norte y la unidad de trabajo de servicios de estudios de la Oficina del geómetra general. Rob es miembro activo de la Comisión 5 de la FIG desde 2002 y delegado del Territorio del norte en el Intercomité de expertos sobre topografía y cartografía: Comité permanente en Geodesia. También es miembro de la Junta de inspectores del Territorio del norte para topógrafos con licencia o registrados.



Tomás Soler ha sido científico del NGS desde 1979. Tom supervisó la rama del sistema GPS de 1990–2003 y actualmente trabaja como jefe técnico de la división de sistemas de referencia espacial del NGS. Tiene un MSc en Ingeniería Civil por la Universidad de Washington, en Seattle, y un doctorado en Ciencias Geodésicas de la Universidad Estatal de Ohio. Entre otras actividades científicas, el Dr. Soler fue editor jefe de la Revista ASCE de Ingeniería topográfica en el periodo 2006–2013.



Richard Stanaway es director de Quickclose, una consultora en geodesia especializada en el análisis de datums geodésicos, la estimación de parámetros de transformación, el modelado de deformación tectónica y el desarrollo de software geodésico. Después de completar sus estudios de Topografía en la Universidad Tecnológica de Queensland, Richard trabajó como topógrafo de exploración en Papúa Nueva Guinea (PNG). En 2000 densificó la red de control geodésico para la Universidad Nacional de Australia (ANU). Este trabajo le llevó a un MSc de investigación en la ANU en el que estudió la viabilidad de un datum geodésico dinámico en PNG, a la vez que realizó el mantenimiento de CORS en la Antártida. Richard realiza consultorías a todas las principales compañías mineras y petroleras en PNG, así como a la Oficina de PNG del geómetra general, a la que asesora en temas geodésicos. Desde 2009, también ha sido doctorando a tiempo parcial en la UNSW en el desarrollo de modelos de deformación para la próxima generación de datos geodésicos y ha trabajado en estrecha colaboración con colegas de Nueva Zelanda. Es presidente del grupo de trabajo sobre modelado de deformación para los marcos de referencia regionales de la AIG y también es miembro activo del grupo de trabajo de marcos de referencia en la práctica de la FIG.



El **Dr. Neil D. Weston** es director adjunto del Servicio Geodésico Nacional (NOAA). Sus principales áreas de interés son los GNSS, la teledetección y el procesamiento de imágenes 3D. Neil es miembro de la Federación internacional de geómetras, del Instituto americano de Física y de la Asociación americana para el avance de la ciencia.

PUBLICACIONES DE LA FIG

Las publicaciones de la FIG se dividen en cuatro categorías. Esta división debería ayudar a miembros y a otros usuarios a identificar el perfil y el propósito de las diversas publicaciones.

Declaraciones de la FIG

Declaraciones políticas de la FIG, como declaraciones políticas y recomendaciones aprobadas por la Asamblea general de la FIG. Se preparan para explicar las políticas de la FIG en temas importantes a políticos, agencias gubernamentales y otros tomadores de decisiones, así como topógrafos y otros profesionales.

Guías de la FIG

Las guías de la FIG son directrices técnicas o de gestión aprobadas por el Consejo y registradas por la Asamblea general. Se preparan para hacer frente a cuestiones profesionales y proporcionar una guía para la profesión topográfica y los asociados pertinentes.

Informes de la FIG

Los informes de la FIG son informes técnicos que representan los resultados de las reuniones científicas y de las comisiones de grupos de trabajo. Los informes los aprueba el Consejo e incluyen información valiosa sobre temas específicos de interés para los miembros de la profesión y para topógrafos individuales.

Reglamento de la FIG

El reglamento de la FIG incluye estatutos, normas internas y planes de trabajo aprobados por la FIG.

Lista de publicaciones de la FIG

Para obtener una lista actualizada de las publicaciones, visite:
www.fig.net/pub/figpub

ACERCA DE LA FIG



La Federación Internacional de Geómetras es la principal organización internacional que representa los intereses de los topógrafos en todo el mundo. Es una federación de asociaciones miembros nacionales y cubre toda la gama de campos profesionales dentro de la comunidad topográfica global. Proporciona un foro internacional para la discusión y el desarrollo con el objetivo de promover prácticas y estándares profesionales.

La FIG se fundó en 1878 en París como la Fédération Internationale des Géomètres (FIG), pero ha pasado al inglés como International Federation of Surveyors (FIG). Es una organización no gubernamental reconocida por las Naciones Unidas y el grupo del Banco Mundial, representa a 120 países miembro a lo largo del mundo y su objetivo es asegurar que las disciplinas de topografía y todos los que la practican satisfagan las necesidades de los mercados y las comunidades a las que sirven.



La Comisión 5 de la Federación Internacional de Geómetras (FIG) es responsable de asistir a los topógrafos que ejercen en las asociaciones miembro de la FIG en aplicar tecnologías de posicionamiento y medición eficiente y eficazmente en sus actividades de medición día a día. Una de las tecnologías más importantes en las últimas décadas han sido los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), cuyo auge ha puesto de manifiesto la necesidad de los países de cambiar de datums geodésicos definidos localmente a datums más globales basados en el Marco de Referencia Terrestre Internacional. Esta publicación de la FIG es una respuesta de la Comisión 5 a esta tendencia, al reunir una serie de fichas técnicas para informar mejor a los topógrafos sobre algunos de los temas clave que deberán tener en cuenta, conforme realinean y mejoran su base de conocimientos profesionales.