

Escuela Regional

“Nuevas técnicas geodésicas para América Latina y el Caribe”

Introducción

Raúl Perdomo

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

perdomo@presi.unlp.edu.ar

Entre el 5 y el 12 de abril de 2021 se desarrolló en forma virtual la Escuela Regional “Nuevas técnicas geodésicas para América Latina y el Caribe” con la participación de docentes de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) y numerosos expertos invitados.

Objetivos particulares de la Escuela Regional:

-Formar profesionales a nivel de posgrado para utilizar la información geodésica generada por AGGO y otras instalaciones similares y por SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas).

-Contribuir con la hoja de ruta para la implementación del GGRF (Global Geodetic Reference Frame) del Subcomité de Geodesia de UN GGIM Américas (Naciones Unidas, Gestión Global de Información Geoespacial) en el capítulo de formación de Recursos Humanos.

-Facilitar y promover la movilidad de estudiantes y docentes de posgrado en la región.

-Impulsar la cooperación regional en la formación de posgrado incorporando paulatinamente otras temáticas aprovechando capacidades instaladas en distintos países.

Contexto Institucional

La idea de desarrollar una escuela de posgrado en Geodesia y disciplinas afines se planteó por primera vez en la reunión internacional de SIRGAS 2019 (D Del Cogliano & R Perdomo 2019) y tuvo una cálida acogida.

Inmediatamente después, el proyecto se planteó en el seno del Comité Científico del Observatorio Geodésico Argentino Alemán (AGGO) en el entendimiento que una escuela de estas características tendría un especial interés con la participación de este Observatorio. Contando con la aprobación de este Comité, la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata y el compromiso del personal de AGGO de participar activamente se diseñó un proyecto que a grandes rasgos debía reunir:

- La participación central de docentes investigadores de la FCAG para el dictado de las clases, especialmente las que presentaban mayor componente teórica,
- La participación del personal de AGGO para el imprescindible aporte



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

instrumental, visitas guiadas y charlas específicas,

- El aporte de especialistas de otras Instituciones Gubernamentales y Académicas de toda América Latina y el Caribe.

El carácter latinoamericano y caribeño de esta actividad necesitaba entonces del involucramiento de una nueva organización que contribuyera con la difusión de la Escuela, como así también que la “adoptara como propia” agregando aportes de un conjunto de investigadores de las Universidades de la región.

Este aporte vino de la mano de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM) que debatió el proyecto en dos Comisiones Permanentes, Posgrado y Ciencia y Técnica resultando aprobado en todas las instancias. Entonces AUGM puso en manos del Nucleo Disciplinario de Geotecnologías y Ciencias de la Atmósfera, el más aproximado a la temática de la Escuela, y en conjunto se acordó, no solo utilizar todos los recursos al alcance de AUGM para una amplia difusión, sino también incorporar a la Escuela una Jornada AUGM que contara con la participación activa de especialistas de las Universidades de la Asociación. Así se incorporó un día a la programación original:

- Jornada AUGM en el marco de la Escuela para la descripción de las principales líneas de trabajo de las Universidades de la Asociación relacionadas con la Geodesia y disciplinas afines.

Definido completamente el proyecto resultaba imprescindible que la FCAG acreditara la Escuela como actividad de Posgrado. La presentación contó con el dictamen favorable de la Comisión de Grado Académico y finalmente, la aprobación unánime del Consejo Directivo de la Institución.

Programa Completo:

Cada fila de la tabla siguiente representa la actividad desarrollada cada día a partir del 5 de abril de 2021, incluida la mañana del sábado 10, y la jornada AUGM el lunes 12.

Tema	Visitas virtuales al Observatorio AGGO	Conferencias y presentaciones institucionales
Sistemas y marcos de referencia geométricos (ITRS, ITRF, EOP), Escalas de Tiempo (TAI, TUC, TU1, tiempos coordinados)	Bienvenida, recorrida general y laboratorio de tiempo	IAG y GGOS: la ciencia para el GGRF.
Interferometría de Línea de Base Muy Larga (VLBI)	VLBI y operación del sistema	SIRGAS. "Estado del marco de referencia SIRGAS: desarrollos recientes y nuevos desafíos"
Distanciometría Láser a Satélites (SLR)	SLR y acceso a los datos	UN-GGIM: Américas. "Marco de Referencia Geodésico Global de las Naciones Unidas para el



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

		Desarrollo Sostenible”.
Marco conceptual para la Geodesia Física y marcos de referencia físicos (IGRF e IHRF)	Laboratorio de Gravimetría y sensores ambientales	El IPGH. Plan estratégico para el desarrollo de la IDE de las Américas.
Gravimetría absoluta y relativa de muy alta precisión	Global Navigation Satellite Systems (GNSS), vínculos locales	
Estado del arte de los sistemas GNSS		
Jornada AUGM		

Resultados:

La Escuela recibió a 133 estudiantes de distintas nacionalidades, lo que indica el interés por esta temática en la región, así como la necesidad de generar este tipo de escuelas que nivelan conocimientos y contribuyen a la integración regional. Para tener una dimensión más precisa de este aspecto asistieron estudiantes de los siguientes países:

Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Guatemala, Mexico, Nicaragua, Panamá, Perú, Puerto Rico, República Dominicana, Uruguay, Venezuela.

78 de ellos recibieron certificados de aprobación expedidos por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, y de asistencia los restantes.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Sistema y marco de referencia terrestre

Claudio Brunini

AGGO – CONICET y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísica
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS¹) es un conjunto de definiciones, convenciones, constantes y modelos matemáticos que permiten establecer un sistema euclidiano tridimensional de ejes (X,Y,Z), co-rotante con la corteza terrestre, con origen en geocentro, eje Z cercano al polo norte de rotación y eje X cercano al meridiano de Greenwich.

El Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF²) es la materialización práctica del ITRS. Consiste en un conjunto de puntos monumentados sobre la superficie terrestre a los que se les asigna posiciones (X₀,Y₀,Z₀) en una época convencional (t₀) y velocidades (X',Y',Z') que, eventualmente, pueden variar con el tiempo (X'(t),Y'(t),Z'(t)).

Para calcular las posiciones y velocidades del ITRF se combinan resultados proporcionados por cuatro técnicas de medición: VLBI³, SLR⁴, GNSS⁵ y DORIS⁶, cuya operación es coordinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG⁷) a través de cuatro servicios internacionales IVS⁸, ILRS⁹, IGS¹⁰ e IDS¹¹.

Cada servicio calcula regularmente una solución con las posiciones de todas sus estaciones usando las mediciones acumuladas en un intervalo determinado (p. ej., 24 hs en IGS o una semana en ILRS). El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS¹²) combina las soluciones acumuladas a lo largo de los años por los 4 servicios y genera el ITRF. A la fecha se han generado 13 ITRFs, el primer fue el ITRF 1988 y el más reciente el ITRF 2014.

Los ITRFs han mejorado por la acumulación de mediciones, por el aumento de estaciones y por la mejora de los métodos de cálculo. El ITRF 88 estuvo basado en VLBI y SLR y contó con 120 estaciones; el 91 incluyó a GNSS y el 94 a DORIS. ITRF 2014 cuenta con 1499 estaciones distribuidas en 975 sitios.

Cada técnica aporta fortalezas complementarias: el geocentro es materializado principalmente por SLR, la escala por SLR y VLBI, la orientación del eje X por VLBI, la orientación del eje Z por GNSS y la cobertura global por GNSS y DORIS.

Las posiciones de las estaciones monumentadas sobre la corteza terrestre varían con el tiempo a causa de diferentes procesos geofísicos. El de mayor magnitud es la deriva continental, que genera desplazamientos de las masas continentales y los lechos oceánicos, deforma la corteza y origina terremotos y erupciones volcánicas en las cercanías de las fallas activas.

Los terremotos provocan dos tipos de desplazamientos: un salto abrupto en la posición de la estación, denominado desplazamiento co-sísmico, y un lento reajuste de la

¹ International Terrestrial Reference System

² International Terrestrial Reference Frame

³ Very Long Baseline Interferometry

⁴ Satellite Laser Ranging

⁵ Global Navigation Satellite Systems

⁶ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellites

⁷ International Association of Geodesy

⁸ International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

⁹ International SLR Service

¹⁰ International GNSS Service

¹¹ International DORIS Service

¹² International Earth Rotation and Reference Systems Service



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

velocidad de desplazamiento, denominado relajación post-sísmica. Las velocidades de 123 estaciones en 117 sitios del ITRF 2014 se hallan afectadas por movimientos sísmicos.

La corteza terrestre también se deforma a causa de la presión ejercida sobre ella por diferentes cargas, p. ej.: agua de los océanos, aire de la atmósfera, agua superficial y subterránea, hielos, etc.

Si las cargas varían en el tiempo, las deformaciones también lo hacen. Se distinguen dos tipos de variaciones: las mareales, que responden a la marea astronómica; y no-mareales, que responden a otros fenómenos geofísicos. Las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol, combinadas con la fuerza centrífuga de la traslación terrestre, generan deformaciones de la tierra sólida (marea terrestre); y redistribuciones de las aguas oceánicas (marea oceánica) y el aire en la atmósfera (marea atmosférica). Las mareas oceánica y atmosférica producen, a su vez, deformaciones variables de la corteza terrestre. Ente las cargas no mareales se hallan los hielos que se derriten y vierten agua a los océanos, disminuyendo la carga de hielo y aumentando la de agua; el agua superficial y subterránea, etc.

Las soluciones calculadas por el IVS, el ILRS, el IGS y el IDS están libres de variaciones mareales, pero contienen las variaciones no-mareales. Estas últimas son representadas por el ITRF 2014 con cuatro formulaciones matemáticas: lineal (velocidad constante); periódica (coeficientes armónicos); co-sísmica (un salto); y post-sísmica (coeficientes de funciones exponenciales y logarítmicas).

El insumo básico para calcular el ITRF son las series temporales de soluciones proporcionadas por los servicios. ITRF 2014 acumuló 35 años de soluciones de VLBI, 32 años de soluciones de SLR, 21 años de soluciones de GNSS y 22 años de soluciones de DORIS. En forma resumida, el proceso de cálculo es el siguiente:

- Se aplican condiciones mínimas a todas las soluciones de SLR, provistas por el ILRS bajo la forma de ecuaciones normales débilmente condicionadas (*'loosely constrained'*).
- Se aplican condiciones de no traslación ni rotación global (*'no net translation, no net rotation'*) a las soluciones de VLBI, provistas por el IVS bajo la forma de ecuaciones normales libres.
- Se utilizan sin cambios las soluciones de GNSS y DORIS, provistas por el IGS y el IDS bajo la forma de ecuaciones normales con condiciones mínimas.
- Se calculan soluciones multi-anales para cada técnica resolviendo, cómo incógnitas las posiciones y velocidades de las estaciones, los parámetros de orientación de la Tierra, las variaciones periódicas anuales y semi-anales y los siete parámetros de transformación de similaridad entre la solución de cada época y la solución multi-anual.
- Los desplazamientos co-sísmicos y la relajación post-sísmica en las estaciones afectadas por terremotos se corrigen antes de calcular las soluciones multi-anales.
- Se identificaron y corrigieron o descartaron los datos discordantes y discontinuidades en las soluciones multi-anales de cada técnica.
- Se combinan las cuatro soluciones multianuales aplicando las vinculaciones locales y la igualación de velocidades en sitios co-localizados.

Como se ha visto, ITRF resulta del esfuerzo mancomunado y sostenido en el tiempo de la comunidad geodésica internacional. Su última realización, el ITRF 2014, proporciona la mejor referencia geodésica global para el estudio de numerosos problemas geofísicos y para la operación de muchas misiones espaciales.

Referencias

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016) ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

- Drewes, H. (2011) How to Fix the Geodetic Datum for Reference Frames in Geosciences Applications? IAG Symposia, volume 136, pp. 67-76.
- Koalevsky, J, Seidelmann, P. K. (2004) Fundamental of Astrometry, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0 521 64216 7.
- Petit, G., Luzum, B. (2010) IERS Conventions (2010), IERS Tech. Note 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179 pp., Frankfurt am Main, Germany.
- Sánchez L., Drewes H. (2020) Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America. IAG Symposia, Springer, doi 10.1007/1345_2020_91.



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Sistema y marco de referencia celeste internacional y parámetros de la orientación terrestre

Laura I. Fernández

Laboratorio MAGGIA (UNLP-CIC)
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

lauraf@fcaglp.unlp.edu.ar

El Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS¹³) fue adoptado por la IAU¹⁴ en su XXIII Asamblea General celebrada en Kyoto (Japón) en 1997 en remplazo del catálogo estelar dinámico FK5¹⁵, y entró en vigencia el 1 de enero de 1998. Mientras que los orígenes de referencia y los planos fundamentales del FK5 y sus predecesores estaban relacionados con la dinámica de la Tierra trasladándose en el espacio, los ejes del ICRS son direcciones convencionalmente fijas en el espacio. Aunque diferentes, el plano fundamental y origen de las ascensiones rectas (α) del ICRS se ubican *próximos* (i.e. dentro de las incertezas del FK5 según lo establecido por la IAU) al plano del Ecuador celeste medio y equinoccio dinámico J2000.0 (Kaplan, 2005).

El Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF¹⁶) es la materialización del ICRS y se basa en las coordenadas de radiofuentes extragalácticas observadas las antenas de la Interferometría de línea de base muy larga (VLBI¹⁷). La estabilidad rotacional del marco se basa en la suposición de que las fuentes no tienen movimientos propios. La primera realización del ICRF incluyó 608 radiofuentes, de las cuales sólo 212 objetos admitieron ser calificadas como *fuentes de definición*, esto es, el conjunto de radiofuentes responsables de la orientación de los ejes del ICRS.

A lo largo del tiempo diferentes grupos de expertos vinculados a la IAU y al IERS¹⁸ fueron los encargados del estudio de la estabilidad, la calidad astrométrica de las radiofuentes del marco y de su densificación. El ICRF fue sucedido por el ICRF2 y desde el 1 de enero de 2019 la IAU adoptó el ICRF3 con características únicas respecto de sus predecesores. Efectivamente, el ICRF3 no sólo contiene la información de 40 años de observaciones VLBI en sus frecuencias estándar (banda S/X), sino que también incluye por primera vez datos observacionales en radio a frecuencias mayores (bandas K y X/Ka) (Charlot et al., 2020).

En esta escuela se repasaron las diferencias conceptuales entre sistema y marco de referencia, ejemplificando el método de los cuatro pasos (Kovalevsky & Mueller, 1989) para la materialización de un sistema de referencia celeste. Asimismo, y luego de la presentación de una línea de tiempo enfocada en las características técnicas del ICRF hasta nuestros días, se presentaron brevemente los lineamientos teóricos de la Precesión y la Nutación terrestre para introducir a los Parámetros de la Orientación Terrestre (EOP¹⁹).

Los EOP constituyen un juego de 5 parámetros que caracterizan completamente la orientación de la Tierra en el espacio, pero que también se utilizan para estudiar las irregularidades de la rotación terrestre. Dos de ellos corresponden a los *corrimientos del polo celeste* (más conocidos por su denominación en inglés: *celestial pole offsets*) y tienen en cuenta

13 International Celestial Reference System

14 International Astronomical Union

15 Fifth Fundamental Catalogue

16 International Celestial Reference Frame

17 Very Large Baseline Interferometry

18 International Earth Rotation and reference systems Service

19 Earth Orientation Parameters



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

las diferencias entre la determinación observacional (VLBI) del polo celeste y su posición establecida por las teorías convencionales de precesión y nutación vigentes al momento del cálculo. Los apartamientos de la rotación terrestre con respecto a un giro uniforme pueden estudiarse y monitorearse a partir de los 3 parámetros adicionales. Dos de ellos (xp e yp , conocidos como las componentes del *movimiento del polo*) no son otra cosa mas que las componentes ecuatoriales de la posición del eje instantáneo de rotación en el sistema de referencia terrestre. El parámetro restante refiere a la diferencia entre el valor real de la velocidad angular de rotación de la Tierra y un valor constante (convencionalmente establecido) que debería tener la Tierra si rotara a velocidad uniforme. Un cambio en la velocidad del giro terrestre provocará obviamente un cambio en la longitud del día y es por esto que el parámetro en cuestión suele denominarse como ΔLOD^{20} , o *variación a la longitud del día*. Su estimación se efectúa a partir de las diferencias entre dos escalas de tiempo: una escala no uniforme que contempla la velocidad real de rotación de la Tierra (TU1^{21}) y una escala de tiempo uniforme derivada del tiempo atómico internacional (TUC^{22}).

Dado que los EOP (Bizouard et al, 2019) caracterizan la rotación del marco de referencia terrestre con respecto a un marco de referencia celeste con origen en el geocentro, los aplicamos para transformar posiciones entre los marcos de referencia terrestre y celeste. Se presentan y desarrollan las transformaciones matriciales en términos del sistema de referencia celeste dinámico (modelo de precesión IAU1976 según Lieske et al., 1977 y de nutación IAU1980 según Seidelman, 1982) y del sistema de referencia celeste cinemático aplicando para ello la convenciones IAU2010 (IERS TN36, 2010) que involucran el uso del plano de referencia celeste intermediario (CIRS²³), los respectivos orígenes no rotantes (CIO²⁴, TIO²⁵) y el modelo de precesión y nutación IAU2000 (Capitaine et al., 2003, 2005).

Referencias

- Bizouard, C., Lambert, S., Gattano, C., Becker, O., Richard, J. Y. (2019). The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014. *Journal of Geodesy*, 93(5), 621-633. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1186-3>.
- Capitaine, N., Wallace, P. T., Chapront, J. (2003) Expressions for IAU 2000 precession quantities, *A&A*, 412, 567–586.
- Capitaine, N., Wallace, P. T., Chapront, J. (2005) Improvement of the IAU 2000 precession model, *A&A*, 432, 355–367.
- Charlot, P., Jacobs, C. S., Gordon, D., Lambert, S., de Witt, A., Böhm, J., ... Gaume, R. (2020) The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. *Astronomy & Astrophysics*, 644, A159.
- IERS TN36 (2010) IERS Conventions 2010. G. Petit and B Luzum (eds.). ISSN: 1019-4568 (print version).
- Kaplan G. H. (2005) The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales, and Earth Rotation Models Explanation and Implementation. United States Naval Observatory circular N° 179. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0602086.pdf>.
- Kovalevsky, J. y Mueller, I. (1989) Introduction in Reference frames in Astronomy and Geophysics. J. Kovalevsky, I. Mueller y B. Kolaczek (eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, W., Morando, B. (1977) Expressions for the precession quantities based upon the IAU 1976 system of astronomical constants. *Astronomy and Astrophysics*, 58, 1-16.

20 Length-Of-Day

21 Tiempo Universal 1

22 Tiempo Universal Coordinado

23 Celestial Intermediate Reference System

24 Celestial Intermediate Origin

25 Terrestrial Intermediate Origin



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Seidelmann, P. K. (1982) 1980 IAU theory of nutation: The final report of the IAU working group on nutation. *Celestial mechanics*, 27(1), 79-106.



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

VLBI geodésico

Laura I. Fernandez^{1,2}, María Eugenia Gómez²

1 Laboratorio MAGGIA (UNLP-CIC), Argentina

2 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

Para fijar un TRF²⁶ (Marco de Referencia Terrestre) en una determinada época (definición del datum) se necesitan siete parámetros que están dados por su origen, la escala, y la orientación a los que debe sumarse su evolución temporal. Cada una de las técnicas de la geodesia espacial contribuye de manera distinta en la determinación de estos parámetros que hacen a la realización del sistema de referencia terrestre

Desde el primer ITRF²⁷ (Marco de Referencia Terrestre Internacional), en 1984 hasta el último, las técnicas utilizadas en la definición del datum no han sido siempre las mismas. Por ejemplo, en los primeros ITRFs la escala y la orientación fueron definidas promediando soluciones SLR²⁸ (Radiometría Laser a Satélite), mientras que en posteriores realizaciones también se sumaron soluciones GPS²⁹ (Sistema de Posicionamiento Global) para la definición del origen. Así también VLBI³⁰ (Interferometría de Muy Larga Línea de Base) se sumó luego en la determinación de la escala. La orientación fue cambiando de manera de alinear cada ITRF a su predecesor. En lo relacionado a la determinación de los EOP³¹ (Parámetros de Orientación Terrestre en el espacio), VLBI juega un rol destacable frente a SLR o GNSS³² (Sistema Global de Navegación por Satélite) (Bizouard y Gambis, 2005)

A diferencia de GNSS o SLR cuyos objetivos son satélites ubicados a miles de kilómetros de la Tierra, VLBI observa radiofuentes tan lejanas que pueden considerarse prácticamente fijas en el espacio, constituyendo así un sistema cuasi inercial. Efectivamente, VLBI es la única de las técnicas de la Geodesia Espacial capaz de materializar el ICRS³³ (Sistema de Referencia Celeste Internacional) a través del ICRF³⁴ (Marco de Referencia Celeste Internacional).

Junto con SLR, VLBI es una de las técnicas más costosas en términos de instalación y mantenimiento, razón por la cual, existen pocas estaciones en el hemisferio Sur lo que resulta en errores sistemáticos en la reducción matemática de los observables en detrimento de la calidad de las posiciones de las radiofuentes observadas con VLBI y de los EOP que pueden ser determinados por esta técnica (TN35). Por lo anterior, la instalación de estaciones como AGGO³⁵ (Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia) y otras futuras como el CART³⁶ (Radio Telescopio chino-argentino) en Argentina constituyen un valioso aporte a la necesaria densificación de la técnica en el hemisferio austral.

La observación VLBI es del tipo interferométrico en una banda de frecuencias que abarca los 8 y 3 Ghz para los conocidos como VLBI legacy, y de 2 a 14 Ghz para VGOS³⁷ (Sistema de

26 Terrestrial Reference Frame

27 International Terrestrial Reference Frame

28 Satellite Laser Ranging

29 Global Positioning System

30 Very Long Baseline Interferometry

31 Earth Orientation Parameters

32 Global Navigation Satellite System

33 International Celestial Reference System

34 International Celestial Reference Frame

35 Argentinean-German Geodetic Observatory

36 Chinese-Argentina Radio Telescope

37 VLBI Global Observing System



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Observación Global con VLBI). El observable de interés es el retardo de grupo a partir del cual se pueden derivar todas las componentes de una línea de base.

Una solución obtenida con VLBI implica numerosas tareas previas: la planificación o scheduling; la realización de la sesión (tiempo total en que muchas estaciones observan un conjunto de radiofuentes divididas en scans); la correlación y exportación de los resultados en el formato apropiado; el análisis realizado por los centros de análisis y de datos y, por último, el análisis y estudio a partir de la aplicación de los productos generados por la técnica que realiza la comunidad científica (p. ej. parámetros de orientación terrestre, retardos troposféricos, coordenadas, etc).

En el camino entre la planificación y la obtención de productos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- la frecuencia de observación, que en este caso se trata de las frecuencias asociadas a las bandas S/X (VLBI legacy) o VGOS,
- las diferencias entre las radioantenas (excepto VGOS), dado que estas poseen desde distinta montura y máscara de elevación hasta diferente diámetro y velocidad de movimiento,
- la presencia de la atmósfera terrestre afectando la propagación de las radio señales en su camino desde las radiofuentes hasta las estaciones en Tierra y la corrección por efectos relativistas,
- según se trate de determinación del ITRF, EOPs en general o sólo UT1-UTC³⁸, entre otras, el tiempo de cada observación o la duración de cada sesión puede variar desde 1 hora hasta algunos días,
- mientras la sesión ocurre, la Tierra rota y se generan efectos doppler residuales que deben ser corregidos

Estos son algunos de los muchos factores que deben considerarse durante el procesamiento de los datos.

A lo largo de este curso se presentó una introducción a la técnica VLBI desde los principios físicos más elementales hasta sus aplicaciones, deteniéndonos especialmente en el funcionamiento y la aplicación de diferente software científico específico normalmente utilizado en las distintas etapas del procesamiento de los datos y en la planificación de la sesión.

Referencias

- Bizouard, C., Gambis, D. (2005) The combined solution C04 for Earth Orientation Parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2005. Observatoire de Paris, SYRTE.
https://www.vlbi.at/data/publications/2021_Nothing_nagel_Elements_of_VLBI_20210309.pdf.
- IERS Technical Note 36 (2010) IERS Conventions 2010. Frankfurt am Main: Verlag des desamtsfürKartographieundGeodäsie, G. Petit, & B. Luzum (eds.).
- IERS Technical Note 35 (2009) The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. Presented on behalf of the IERS/ IVS Working Group. Frankfurt am Main: Verlag des desamtsfürKartographie und Geodäsie, A.L. Fey, D. Gordon y C.S. Jacobs (eds).
- Nothing_nagel A. (2021) Very Long baseline Interferometry.
- Sovers, O. J., Faselow, J. L., Jacobs, C. S. (1998) Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. Rev. Mod. Phys. 70, 1393. doi: 10.1103/RevModPhys.70.1393.
- Thompson, A. R., Moran J. M., Swenson, G. W. (2003) Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy - 3era edición, A&A Library.

38Tiempo Universal 1 -Tiempo Universal Coordinado



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Distanciometría Laser a Satélite (SLR)

Luciano P. O. Mendoza

"Laboratorio de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

En el marco de las actividades programadas para la Escuela Regional “Nuevas técnicas geodésicas para América Latina y el Caribe”, realizada entre el 5 y el 10 de abril de 2021, se dictó un módulo teórico-práctico acerca de la técnica Satellite Laser Ranging (SLR). El programa incluyó la puesta en contexto de la técnica SLR junto a las demás técnicas fundamentales de la Geodesia Espacial (es decir, GNSS, VLBI y DORIS) así como la descripción detallada de los parámetros que permite *observar* (incluyendo la longitud del día, las órbitas satelitales, las coordenadas de las estaciones, las coordenadas del geocentro, el campo de gravedad, etc.). Así mismo, se desarrolló en profundidad la aplicación del método de cuadrados mínimos a la estimación de parámetros de interés a partir de observaciones multianuales SLR, incluyendo la técnica de *apilado de ecuaciones normales*, la introducción de *condicionamientos absolutos y relativos* a los valores a priori y la *preeliminación de parámetros* al nivel de las ecuaciones normales a fin de optimizar los tiempos de cómputo. Se realizó una detallada descripción de la técnica SLR, incluyendo su *ecuación de observación*, el *segmento espacial* específico (LAGEOS, Etalon, Starlette & Stella, GNSS, etc.) y el *segmento terrestre* (las estaciones de rastreo). Se describió la generación del *observable* puntos normales (NP), incluyendo el algoritmo estándar, su dependencia de la misión rastreada y sus adaptaciones a las nuevas estaciones con capacidad de alta tasa de muestreo. Finalmente, se describió brevemente el correspondiente servicio (el Servicio Internacional de Distanciometría Laser, ILRS), los productos operacionales y de reprocesamiento disponibles, y las múltiples aplicaciones avanzadas de SLR (orbitografía, tectónica, campo de gravedad, etc.). Durante las actividades prácticas los y las asistentes realizaron individualmente un análisis paso a paso de una red global SLR, generando una solución semanal basada en observaciones a los satélites LAGEOS 1 y LAGEOS 2. El análisis comenzó al nivel de las observaciones crudas (los puntos normales) y culminó al nivel de las ecuaciones normales, estimando varios parámetros geodinámicos. En particular se estimaron coordenadas medias semanales para el geocentro y se compararon estas con series temporales independientes. Los doce pasos requeridos para completar el procesamiento se realizaron utilizando el Bernese GNSS Software (BSW) e incluyeron: el cómputo de coordenadas a priori a la época de observación (algunas trayectorias con deformación post sísmica), manejo de los parámetros de orientación terrestre (EOP) necesarios, conversión de órbitas SLR a priori entre formatos estándar (de CPF a SP3c), conversión de observaciones SLR entre formatos estándar (de CRD a RINEX), manejo de las observaciones meteorológicas (METEO) necesarias, estimación y mejorado de órbitas SLR, estimación de solución SLR diaria y apilado e inversión de solución SLR semanal. El último paso del trabajo consistió en la comparación gráfica de los resultados con los obtenidos con otra técnica (en este caso DORIS) y por medio de un análisis más refinado (también con SLR). En la práctica, los y las asistentes realizaron este análisis SLR utilizando la plataforma educativa Jupyter, con cuentas individuales en un servidor instalado ad-hoc, lo que les permitió convenientemente acceder a la configuración del software BSW, ejecutar los pasos de procesamiento secuencialmente y finalmente graficar los resultados obtenidos. Tanto el material teórico (incluyendo una abundante reseña bibliográfica) como la correspondiente hoja de notas Jupyter (incluyendo resultados parciales, finales y gráficos) quedaron a disposición de los y las asistentes a este módulo.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Geodesia Física

Marco conceptual

Daniel Del Cogliano

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

ddelco3057@gmail.com

Las alturas físicas, el sistema de referencia vertical, el sistema de referencia de la gravedad, y los correspondientes marcos de referencia, son temas de gran actualidad de la Geodesia.

Los cursos de Topografía, Agrimensura y otras disciplinas afines, en muchos casos abordan parcialmente algunos de estos tópicos. Por eso, en esta Escuela Regional nos hemos planteado la necesidad de resumir ordenadamente un conjunto de conceptos relacionados con el Campo de la Gravedad terrestre, que consideramos imprescindibles para comprender los temas más específicos desarrollados en sucesivas exposiciones.

Según Friedrich Robert Helmert (1880), “Geodesy is the science of the measurement and mapping of the earth's surface”. Esta definición de pocas palabras involucra conceptos profundos sobre la geometría y la física de la Tierra, y nos comunica que la Geodesia es la responsable de velar por las correctas mediciones y representaciones de la superficie terrestre.

Pero ¿cuál es la superficie de la Tierra? ¿Los continentes y el fondo de los mares o la tierra sólida y el nivel de los océanos? Más allá de una u otra respuesta, es interesante que la Geodesia nos permita representar todo eso, y de hecho es así.

La superficie de la Tierra está cubierta en un 70 % por agua, por eso, la forma del planeta, como lo vemos desde su exterior, está determinada en gran parte por los océanos. Pero los mismos son afectados permanentemente por la acción de la Luna y el Sol, que producen el fenómeno de las mareas lunisulares. En consecuencia, la única manera de definir un nivel medio de los mares es promediando sus ascensos y descensos. Se obtiene así el “Nivel Medio del Mar” o MSL (Mean Sea Level).

Si las fuerzas que actúan sobre los océanos fueran solo conservativas, el MSL sería una superficie de nivel o superficie equipotencial del Campo de la Gravedad terrestre. Pero existen otras fuerzas vinculadas con las corrientes oceánicas, las diferencias de temperaturas y de salinidad del agua, que generan una superficie topográfica del mar (Sea Surface Topography-SST), que aparta al MSL de una superficie equipotencial unos pocos decímetros en gran parte del planeta, llegando a valores próximos a un metro.

Por eso el geoide se define como “la Superficie Equipotencial del Campo de la Gravedad terrestre que mejor ajusta al MSL de una determinada época”. La época indica que los niveles medios del mar cambian en largos períodos de tiempo. El geoide y el MSL serán superficies similares, pero no idénticos.

Es muy útil representar el Campo de la Gravedad de la Tierra real como el Campo Normal de una Tierra simplificada con forma elipsoidal, con una distribución de masa conocida muy fácil de modelar, y un Campo Perturbador que considera todas las diferencias entre la realidad y la simplificación asumida.

El análisis del Campo Perturbador implica entonces el estudio de la distribución de las masas en la Tierra. A nivel planetario, la correspondiente representación se realiza a través de los Modelos Geopotenciales. Se trata de un desarrollo matemático en armónicos esféricos con miles de términos y coeficientes numéricos, que permite calcular el Campo Perturbador en cualquier punto exterior a la Tierra. A partir del mismo, es posible estimar los observables del



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Campo de la Gravedad, como “la anomalía de la gravedad”, “la deflexión de la vertical” y “la ondulación del geoide”.

Para el tratamiento del cálculo del geoide a nivel regional y local se describieron los métodos gravimétricos de Stokes y Molodensky, poniendo énfasis en las diferencias conceptuales de ambos planteos. Uno sobre la superficie del geoide y el segundo a nivel de la superficie topográfica.

El Campo de la Gravedad en las proximidades de la superficie terrestre está directamente asociado a la definición, la medición y la determinación de las alturas físicas que utilizamos con distintos fines.

Las alturas ortométricas, dinámicas y normales pueden ser calculadas a partir de los “números geopotenciales”, $C = W(P) - W_0$. En la práctica esta diferencia de potencial requiere de mediciones de nivelación y de gravedad en el terreno. Finalmente, las distintas alturas físicas se obtienen dividiendo el mismo “número geopotencial” por una gravedad diferente en cada caso. En particular, la altura ortométrica que separa al observador del geoide, requiere la gravedad media entre ambos, que es una cantidad que no podemos medir y solo podemos obtener sumando una hipótesis de densidad de la corteza.

Finalmente, cuando pretendemos obtener el geoide a través de métodos gravimétricos como los de Stokes ó Molodensky ó a través de un conjunto de puntos altimétricos de alturas ortométricas conocidas, llegamos a la conclusión que, en rigor, el mismo es irrealizable; ya que en todos los casos es necesario incorporar ciertas hipótesis de masa.

Los temas aquí mencionados, son el punto de partida para abordar el resto de los tópicos específicos de Geodesia Física desarrollados en esta Escuela Regional.

Referencias

Wolfgang Torge (2001) Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin, New York, ISBN 3 11 017072 8.

Heiskanen W, Moritz H.(1967). Physical Geodesy. W. H. Freeman and Company, San Francisco and London. eBook ISBN: 978-3-211-27467-5.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Sistema de Referencia Internacional de Alturas

Claudia Tocho

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar

La implementación del Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS³⁹) demanda la definición del Sistema de Referencia Internacional de Alturas (IHR⁴⁰) y de la implementación del Sistema de Referencia Internacional de Gravedad (IGRS⁴¹).

El IHR se basa en la combinación de una componente geométrica dada por las coordenadas geocéntricas cartesianas que se determinan con técnicas geodésicas espaciales (p.ej. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)⁴²) y se refieren al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF⁴³), y una componente física dada por el valor del potencial de gravedad (W_P) en un punto P ubicado en la superficie terrestre definido por las coordenadas del ITRF. La coordenada vertical es el número geopotencial ($C_P = W_0 - W_P$), que fácilmente puede convertirse a alturas físicas (alturas ortométricas, normales o dinámicas). El datum vertical o altura de nivel cero del IHR se define por una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre definida por un valor convencional $W_0 = 62\,636\,853.4\text{ m}^2\text{s}^{-2}$, como lo establece la Resolución No. 1 (Drewes et al., 2016), expedida por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG⁴⁴) durante la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG⁴⁵) realizada en Praga, Republica Checa en 2015.

La implementación del IHR es el Marco de Referencia Internacional de Alturas (IHRF⁴⁶), como lo establece la Resolución No. 3 expedida por la IAG durante la Asamblea General de la (IUGG) realizada en Montreal, Canadá en 2019. El IHRF consiste en un conjunto de estaciones de referencia distribuidas homogéneamente en el mundo con números geopotenciales conocidos o alturas físicas referidas al IHR.

La definición, materialización y mantenimiento del sistema de referencia de altura global, unificado, físico (dependiente del campo de gravedad terrestre), exacto y bien definido es, hoy en día, uno de los objetivos principales y prioritarios de la Geodesia. Se necesita un marco de referencia de altura unificado global para todos aquellos estudios o aplicaciones que requieran una visión global de la Tierra con mediciones no solo en la Tierra sólida, sino también en los océanos y en los casquetes polares (GGOS, 2021), por ejemplo:

- Para promover un marco de referencia confiable para el análisis y modelado preciso de fenómenos globales asociados al campo de gravedad terrestre: variaciones del nivel del mar; determinación de la correlación entre los cambios del nivel del mar y las variaciones de volumen de los casquetes polares; redistribuciones de masa entre la atmósfera, los océanos y el interior terrestre.
- Para lograr una combinación confiable entre alturas físicas y geométricas. Las tradicionales alturas ortométricas no son coherentes a nivel global como si lo son las alturas elipsoidales obtenidas por técnicas geodésicas satelitales como por ejemplo, GNSS.
- Para la unificación precisa de los sistemas de altura nacionales y regionales existentes.

39 Global Geodetic Reference System

40 International Height Reference System

41 International Gravity Reference System

42 Global Navigation Satellite System

43 International Terrestrial Reference Frame

44 International Association of Geodesy

45 International Union of Geodesy and Geophysics

46 International Height Reference Frame



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Durante el desarrollo de la escuela, se analizaron distintas posibilidades para determinar las coordenadas del IHRF, basadas en modelos de gravedad global de alta resolución (GGM-HR⁴⁷), el modelado regional preciso del campo de gravedad para la determinación del geoido o cuasigeoido y la conversión de los sistemas de alturas existentes al IHRF.

También se analizaron los resultados del “Experimento del Colorado” en el cual diferentes grupos de investigación calcularon un geoido o cuasigeoido y a partir de ellos obtuvieron los valores de potencial de gravedad W_p utilizando los mismos datos de entrada, un conjunto de estándares básicos y diferentes métodos de cálculo. El área de estudio está ubicada en el estado de Colorado en Estados Unidos. El objetivo del experimento permitió comparar distintos valores de W_p obtenidos (para evaluar la consistencia entre métodos de cálculo) y con las diferencias de potencial obtenidas de la nivelación más gravimetría (para evaluar la confiabilidad de los resultados). También, el experimento ha permitido la identificación de estándares y convenciones para la determinación de las coordenadas del IHRF.

A partir, de este experimento, se plantean estrategias para:

- La determinación y evaluación de las coordenadas del IHRF dependiendo de la disponibilidad de datos gravimétricos alrededor de la estación.
- La medición de datos gravimétricos para mejorar la determinación de las coordenadas del IHRF.
- La elección de las estaciones del IHRF. Es importante destacar la instalación del observatorio geodésico fundamental Observatorio Argentino – Alemán de Geodesia (AGGO⁴⁸) donde se garantiza la conexión entre el sistema de referencia geométrico (coordenadas geocéntricas cartesianas) con los sistemas de referencia física (potencial de gravedad y gravedad g), así como con la realización del tiempo (relojes atómicos).

La implementación del IHRF solo es posible con una cooperación internacional global. En la actualidad, expertos en el modelado gravimétrico de geoides regionales y locales de América Latina y del Caribe estamos trabajando en la primera solución (estática) del IHRF basada en los recursos existentes.

Referencias

- Drewes, H., Kuglitsch, F., Adam, J., Rózsa, S. (2016) Geodesist’s handbook 2016. J. Geod. 90:907.
<https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>.
<https://ggos.org/about/org/fa/unified-height-system>.
- Sánchez, L., Ågren, J., Huang, J., Wang, Y. M., Mäkinen, J., Pail, R., Barzaghi, R., Vergos, G. S., Ahlgren, K., Liu, Q. (2021) Strategy for the realization of the International Height Reference System (IHRF). J. Geod. 95, 33 (<https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>).

47 High Resolution Global Gravity Models

48Argentinean-German Geodetic Observatory



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Sistema de Referencia Internacional de Gravedad (IGRS) y su materialización (IGRF)

Ezequiel D. Antokoletz

CONICET y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

eantokoletz@fcaglp.unlp.edu.ar

El establecimiento de un nuevo sistema y marco de referencia gravimétrico es uno de los principales objetivos actuales de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG⁴⁹), a través del grupo de trabajo JWG⁵⁰ 2.1.1: *Establishment of a global absolute gravity reference system*. El JWG 2.1.1 ha trabajado en la definición de un Sistema y Marco de Referencia Internacional de Gravedad (IGRS⁵¹ e IGRF⁵²) para lograr un monitoreo global, preciso, homogéneo y a largo plazo del campo de gravedad de la Tierra, aprovechando el potencial de las mediciones de gravedad absoluta actuales.

El marco de referencia gravimétrico vigente, Red de Estandarización Gravimétrica Internacional de 1971 (IGSN71⁵³), fue adoptada en el año 1971 durante la XXV Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG⁵⁴). Dados los avances tecnológicos y la disponibilidad de gravímetros absolutos que superan la precisión alcanzada por IGSN71 (0.1 mGal), la IAG establece en su Resolución N° 2 del año 2015, iniciar el reemplazo de dicho marco de referencia.

La definición propuesta del Sistema Internacional de Referencia de Gravedad (IGRS) se basa en la aceleración instantánea del experimento de caída libre, expresada en el Sistema Internacional de Unidades (SI⁵⁵). Esta cantidad se mide mediante gravímetros absolutos. Dentro de la definición del IGRS se definen una serie de correcciones independientes del tiempo: el sistema *zero-tide* para las correcciones de marea permanente, una atmósfera estándar dada por ISO 2533:1975⁵⁶ y las coordenadas del polo definidas por el Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS⁵⁷).

El Marco de Referencia Internacional de Gravedad (IGRF) se materializa a partir de mediciones con gravímetros absolutos con una precisión de unos pocos μ Gal. Dichos gravímetros deben participar activamente de comparaciones regionales e internacionales a fin de asegurar un nivel de referencia común y su trazabilidad al SI. Las observaciones se realizan en Estaciones de Referencia, entre las cuales se identifican tres tipos:

- 1) Estaciones de Referencia: estaciones en las cuales se cuenta con una función de referencia de gravedad dada a partir de mediciones continuas con gravímetros superconductores o a partir de mediciones periódicas con gravímetros absolutos a fin de captar variaciones estacionales de gravedad.
- 2) Estaciones de Comparación: estaciones de referencia que además cuentan con facilidades para realizar campañas de comparación entre gravímetros absolutos.

49 International Association of Geodesy

50 Joint Working Group

51 International Gravity Reference System

52 International Gravity Reference Frame

53 International Gravity Standardization Net 1971

54 International Union of Geodesy and Geophysics

55 International System of Units

56 ISO 2533:1975 Standard Atmosphere

57 International Earth Rotation and Reference Systems Service



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

- 3) Estaciones Centrales o *core stations*: estaciones de referencia vinculadas al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF⁵⁸), al Marco de Referencia Internacional de Alturas (IHRF⁵⁹), y al Sistema de Observación Geodésico Global (GGOS⁶⁰).

Además, se define para el IGRF un conjunto de modelos convencionales para la corrección de variaciones temporales de la gravedad. Éstos están basados y son compatibles con los Estándares de procesamiento de la Red Internacional Absoluta de Gravímetro Base (IAGBN⁶¹), y se definen a partir de las Convenciones IGRS 2020 (Wziontek et al., 2021).

Con el fin de hacer el marco accesible a los usuarios, se han iniciado esfuerzos para construir una infraestructura basada en estaciones de gravedad absoluta. En este sentido, la Resolución N° 4 de la IAG en el año 2019, alienta a las agencias nacionales a cargo de la infraestructura gravimétrica a establecer estaciones de referencia y participar activamente en la definición del IGRF. Esta infraestructura reemplazará a la red IGSN71. La información y accesibilidad a las observaciones gravimétricas estará dada a partir de la base de datos Agrav⁶² (<http://agrav.bkg.bund.de/agrav-meta/>), mantenida en forma conjunta entre el Buró Gravimétrico Internacional (BGI⁶³) y la Agencia Federal para la Cartografía y la Geodesia (BKG⁶⁴) de Alemania. Ésta servirá como un archivo central para las observaciones y los resultados de comparaciones entre gravímetros absolutos.

A nivel regional, el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO⁶⁵), cuenta con la capacidad y la infraestructura para participar activamente en la materialización del IGRS. El Laboratorio de Gravimetría de AGGO dispone de un gravímetro superconductor, el cual monitorea variaciones del campo de gravedad de la Tierra en forma continua e ininterrumpida desde diciembre del año 2015, y un gravímetro absoluto FG5, el cual fue instalado en enero del año 2018. Además, el observatorio posee dos pilares de gravedad complementarios destinados a la comparación de gravímetros absolutos a nivel regional.

La combinación de las observaciones de ambos gravímetros ha permitido la determinación de una función de referencia de gravedad continua y precisa para el Observatorio (Antokoletz et al., 2020). Con esto, AGGO se convierte en la única estación de referencia y comparación, vinculada al ITRF y al IHRF, en América Latina y el Caribe.

Referencias

- Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. N., Falk, R. (2020) Gravity reference at the Argentinean-German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *J. Geod.* 94, 81 (2020), <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01402-7>.
- Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., Gabalda, G., Mäkinen, J., Pálinkáš, V., Rülke, A., Vitushkin, L. (2021) Status of the International Gravity Reference System and Frame. *J. Geod.* 95, 7 (2021), <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.

58 International Terrestrial Reference Frame

59 International Height Reference Frame

60 Global Geodetic Observing System

61 International Absolute Gravimeter Base Network

62 Absolute Gravity Database

63 Bureau Gravimétrique International

64 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

65 Argentinean-German Geodetic Observatory



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Gravimetría absoluta

Andreas Richter¹, Axel Rülke²

- 1) Laboratorio MAGGIA (UNLP-CIC)
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina
- 2) Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Leipzig, Alemania

La gravimetría absoluta comprende aquellas técnicas gravimétricas que se dedican a la determinación observacional del valor absoluto de la aceleración de gravedad local e instantánea. Entre los campos de aplicación de estos métodos se pueden destacar tres: a) la geodesia, b) la metrología, y c) el estudio del sistema Tierra.

La principal importancia de la gravimetría para la geodesia reside en su capacidad de proporcionar el acceso a una superficie de referencia física para sistemas altimétricos. La gravimetría absoluta de alta precisión permite respaldar los sistemas de referencia gravimétricos nacionales mediante la determinación de valores absolutos de gravedad en algunos puntos gravimétricos seleccionados, garantizando así una consistencia global entre distintos países. Esto explica el papel fundamental que recae en la gravimetría absoluta en los recientes esfuerzos por la unificación internacional de la referencia gravimétrica dentro del Marco de Referencia Internacional de Gravedad (IGRF; Wziontek et al. 2021).

El principal organismo de metrología, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), tiene como misión la definición de estándares físicos. En este empeño los gravímetros absolutos de alta precisión cumplen una función importante, ya que contribuyen a la definición metrológica de unidades de masa. Con el fin de facilitar el acceso a este estándar metrológico a nivel global con máxima exactitud y consistencia se realizan campañas internacionales de comparación de gravímetros absolutos (por ejemplo: Key Comparison 2017, Beijing, China). Los gravímetros participantes en estas campañas se convierten en portadores del nivel de referencia gravimétrico en las subsecuentes comparaciones regionales (por ejemplo: Norteamérica 2016; Europa 2018; Falk et al. 2020)).

El tercer campo de aplicación de la gravimetría absoluta se dirige al estudio observacional de procesos geodinámicos y el monitoreo del sistema Tierra. La gravimetría absoluta ha sido aplicada exitosamente en Escandinavia (Steffen and Wu 2011), Groenlandia (van Dam et al. 2017), Alaska (Tanaka et al. 2015) y Antártida (Mäkinen et al. 2007), entre otras regiones, para la observación de efectos del ajuste glacio-isostático, complementando la deformación cortical determinada mediante GNSS. Por otro lado, los gravímetros absolutos contribuyen al monitoreo de procesos de transporte de masa dentro del sistema Tierra a través de la calibración de gravímetros superconductores (Antokoletz et al. 2020).

La gran mayoría de gravímetros absolutos actualmente en uso se basan en el principio de la caída libre. Durante la caída de un cuerpo de prueba se mide repetidamente su posición vertical y el tiempo. Para la medición de la distancia se realiza mediante la interferometría láser, mientras como normal de tiempo se utilizan relojes atómicos (Rb). En la actualidad la gravimetría absoluta emplea principalmente dos instrumentos: El FG5 (Micro-g 2006) representa el gravímetro absoluto de superior precisión. En condiciones de laboratorio permite alcanzar exactitudes del orden de $\sigma = 20 \text{ nm/s}^2$ ($2 \text{ } \mu\text{Gal}$). Este tipo de instrumento se utiliza para estaciones gravimétricas de referencia (IGRF), para la calibración de gravímetros superconductores u otros gravímetros absolutos, así como en la realización de estándares metrológicos. El segundo gravímetro absoluto actualmente en amplio uso es el A10 (Micro-g 2008). Este instrumento es diseñado para observaciones en el campo y permite alcanzar exactitudes cercanas a $\sigma = 100 \text{ nm/s}^2$ ($10 \text{ } \mu\text{Gal}$) en un período de observación de una hora.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Las mediciones de gravímetros absolutos requieren la aplicación a-posteriori de una serie de correcciones, en particular por: altura del sensor, mareas terrestres, carga oceánica, movimiento del polo y variaciones de presión atmosférica. El IGRF establece pautas con respecto a estas correcciones (Wziontek et al. 2021), tendiendo a una homogenización de la determinación de gravedad absoluta a nivel global. Con el fin de garantizar la documentación y el acceso a datos de gravimetría absoluta se creó la base de datos internacional AGrav (agrav.bkg.bund.de).

La Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA; IGN 2021) del Instituto Geográfico Nacional es un ejemplo para los avances que se lograron en los últimos años en materia de la gravimetría absoluta en América Latina gracias a la cooperación, por un lado, entre países vecinos de la región y, por otro lado, de los organismos responsables de la infraestructura geodésica con las universidades e institutos de investigación (Blitzkow et al. 2018). Otra alianza de importancia estratégica para el desarrollo de la gravimetría absoluta es la cooperación entre la geodesia (representada por la Asociación Internacional de Geodesia, IAG) y la metrología (BIPM) que, frente al desafío de la consitución del IGRF en la práctica, permite unir esfuerzos con beneficio para ambas disciplinas.

Mientras tanto, se está asomando en el horizonte una tecnología innovadora con gran potencial para la determinación de gravedad absoluta en el futuro: la gravimetría cuántica. El gravímetro μ Quans AQG-A (Ménoret et al. 2018) es un ejemplo, ya en el mercado, de una nueva generación de gravímetros absolutos, que emplea átomos fríos en calidad de cuerpo de prueba.

Referencias

- Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. N., Falk, R. (2020) Gravity reference at the Argentinean–German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *J Geod* 94(9):81. doi:10.1007/s00190-020-01434-z.
- Blitzkow, D., Oliveira Cancoro de Matos, A. C., Moraes Bjorkstrom, I., Pacino, M. C., Lauria, E. A., Xavier, E. M. L., Castro Jr., C. A. C., Flores, F., Guevara, N. O., Cano, N. (2018) Absolute gravity network in South America - Comparisons. *Geophysical Research Abstracts* 20:EGU2018-7815.
- Falk, R., Pálinkáš, V., Wziontek, H., Rülke, A., Val'ko, M., Ullrich, Ch., Butta, H., Kostelecký, J., Bilker-Koivula, M., Näränen, J., Prato, A., Mazzoleni, F., Kirbaş Coşkun, C., Van Camp, M., Castelein, S., Bernard, J. D., Lothhammer, A., Schilling, M., Timmen, L., Iacovone, D., Nettis, G., Greco, F., Messina, A. A., Reudink, R., Petrini, M., Dykowski, P., Sękowski, M., Janák, J., Papčo, J., Engfeldt, A., Steffen, H. (2020) Final report of EURAMET.M.G-K3 regional comparison of absolute gravimeters. *Metrologia* 57(1A):07019. doi:10.1088/0026-1394/1A/07019.
- IGN (2021) <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Gravimetria/RAGA>.
- Makinen, J., Amalvict, M., Shibuya, K., Fukuda, Y. (2007) Absolute gravimetry in Antarctica: status and prospects. *J. Geophys.* 43:339-357. doi:10.1016/j.jog.2006.08.002.
- Ménoret, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., Bonvalot, S., Bouyer, P., Landragin, A., Desruelle, B. (2018) Gravity measurements below 10–9 g with a transportable absolute quantum gravimeter. *Sci Rep* 8:12300. doi:10.1038/s41598-018-30608-1.
- Micro-g LaCoste (2006) FG5 User's Manual.
- Micro-g LaCoste (2008) A10 User's Manual.
- Steffen, H. & Wu, P. (2011) Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia - A review of data and modeling. *J. Geodynamics* 52(3-4):169-204. doi:10.1016/j.jog.2011.03.002.
- Tanaka, Y., Sato, T., Ohta, Y., Miura, S., Freymueller, J. T., Klemann, V. (2015) The effects of compressibility on the GIA in southeast Alaska. *J. Geodynamics* 84:55-61. doi:10.1016/j.jog.2014.10.001.
- van Dam, T., Francis, O., Wahr, J., Khan, S. A., Bevis, M., van den Broeke, M. R. (2017) Using GPS and absolute gravity observations to separate the effects of present-day and Pleistocene



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

ice-mass changes in South East Greenland. *Earth Plan. Sci. Lett.* 459:127-135.
doi:10.1016/j.epsl.2016.11.014.

Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., Gabalda, G., Mäkinen, J., Pálinkáš, V., Rülke, A., Vitushkin, L. (2021) Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy* 95(1):7. doi:10.1007/s00190-020-01438-9.



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Gravimetría superconductor

Ezequiel D. Antokoletz

CONICET y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

eamtokoletz@fcaglp.unlp.edu.ar

Los métodos de medición de gravedad se puede dividir en dos tipos: absolutos o relativos (Torge, 1989). En el primer caso, ambas cantidades fundamentales de la aceleración (distancia y tiempo) son medidas con gravímetros absolutos. En el caso de los gravímetros relativos, el instrumento mide solo una de las cantidades fundamentales de aceleración: la distancia. Hoy en día, el principio más utilizado para realizar mediciones relativas es el sistema “masa-resorte”. Los gravímetros superconductores (SG⁶⁶, Figura 1) son, actualmente, los instrumentos relativos más sensibles, en los que el resorte mecánico se reemplaza por un “resorte virtual” (Neumeyer, 2010). Su principio de medición consiste en una esfera superconductor que flota en un campo magnético muy estable generado por dos bobinas superconductoras. La observación consiste en la corriente de compensación en una bobina de retroalimentación para mantener la esfera en una posición de referencia (equilibrio). Este principio proporciona a los instrumentos una alta sensibilidad de 0.01 nm/s^2 y estabilidad en el tiempo. Para garantizar propiedades superconductoras del sistema, el mismo se encuentra inmerso dentro de un baño de helio líquido a una temperatura de 4.7 K. Gracias a la alta sensibilidad y estabilidad de los SG, una gran variedad de fenómenos geofísicos pueden ser estudiados (Hinderer et al., 2007).



Figura 1: El gravímetro superconductor SG038 instalado en AGGO.

El Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO⁶⁷), en su Laboratorio de Gravimetría, cuenta con el único gravímetro superconductor instalado en América Latina y el Caribe. El SG038 (Figura 1) es operado en forma ininterrumpida desde diciembre del año 2015 y desde ese momento registra en forma continua las variaciones del campo de gravedad de la Tierra. Además, un gravímetro absoluto FG5 es operado en el Laboratorio, el cual provee observaciones de gravedad absoluta para la estación AGGO desde enero del año 2018.

66 Superconducting gravimeter

67 Argentinean-German Geodetic Observatory



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Dado que las observaciones de los SGs son realizadas en unidades de Voltaje, el factor de calibración debe ser determinado a fin de transformar dichas observaciones a unidades de gravedad (usualmente nm/s^2). Por otra parte, los SGs son afectados por deriva instrumental, la cual se caracteriza por ser muy pequeña (sólo de algunos $\mu\text{Gal/año}$) y de carácter lineal. Ésta puede ser únicamente determinada a partir de la combinación de las observaciones del SG con las de un gravímetro absoluto. En el caso de AGGO, tanto el factor de calibración como la deriva instrumental fueron determinados a partir de la combinación de sus observaciones con las del gravímetro absoluto FG5 (Antokoletz et al., 2020a).

Una medición de la gravedad es una señal integradora y podría pensarse como la suma de muchos fenómenos físicos que tienen lugar tanto en la superficie como en el interior de la Tierra. Entre los efectos observables con gravímetros superconductores, aquellos de mayor amplitud son: mareas terrestres y oceánicas, efectos atmosféricos, variaciones de gravedad por movimiento del polo y variación en la longitud del día (LOD⁶⁸), efectos de carga no-mareal y efectos hidrológicos, tanto locales como continentales. Mediante un modelado cuidadoso y la eliminación de los efectos de amplitudes mayores, aquellas señales de menor amplitud pueden ser estudiadas.

Distintos estudios se han llevado a cabo con los datos recolectados por el SG038. Antokoletz et al (2017) y Antokoletz et al. (2020b) determinaron modelos de mareas terrestres y oceánicas para la estación, a fin de corregir las observaciones del SG y las del FG5 en forma precisa. Oreiro et al. (2018) han analizado efectos de carga no-mareal debidos a la onda de tormenta en el Río de La Plata y Mikolaj et al. (2019) y Pendiuk et al (2020) han estudiado efectos hidrológicos locales en la estación.

Por último, tanto el SG038 como el resto de SGs en el mundo, forman parte de la red de estaciones del Servicio Internacional para la Geodinámica y las Mareas Terrestres (IGETS⁶⁹). El IGETS es el responsable de recolectar y distribuir mediciones continuas del campo de gravedad realizadas con gravímetros en la superficie terrestre. Dichas mediciones están disponibles a través de su base de datos (<http://isdg.gfz-potsdam.de/igets-data-base/>), en distintos niveles, dependiendo del grado de procesamiento sobre las mismas.

Referencias

- Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. (2017) First six months of superconducting gravimetry in Argentina. En G. S. Vergos, R. Pail, & R. Barzaghi (Eds.), International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016 440 (pp. 111-118). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/1345_2017_13
- Antokoletz, E.D., Wziontek, H., Tocho, C.N., Falk, R. (2020a). Gravity reference at the Argentinean-German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *J Geod* 94, 81. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01402-7>
- Antokoletz E.D., Tocho C., Wziontek H. (2020b). Un modelo de mareas para el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) utilizando observaciones del gravímetro superconductor SG038. *Revista Cartográfica*, (101), 71-97. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i101.689>
- Hinderer J., Crossley D., and Warburton R.J. (2007). Superconducting Gravimetry, *Treatise on Geophysics*, 2nd edition, vol. 3, pp. 59-115.
- Mikolaj, M., Güntner, A., Brunini, C., Wziontek, H., Gende, M., Schröder, S., Cassino, A. M., Pasquaré, A., Reich, M., Hartmann, A., Oreiro, F. A., Pendiuk, J., Guarracino, L., Antokoletz, E. D. (2019). Hydrometeorological and gravity signals at the Argentine-German Geodetic Observatory (AGGO) in La Plata. *Earth System Science Data*, 11, 1501-1513. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1501-2019>

68 Length of Day

69 International Geodynamics and Earth Tide Service



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

- Neumeyer, J. (2010). Superconducting gravimetry. In Sciences of Geodesy-I (pp. 339-413). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Oreiro, F.A., Wziontek, H., Fiore, M.M.E. et al. (2018). Pure Appl. Geophys. 175: 1739. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1651-6>
- Pendiuk, J.E., Guarracino, L., Reich, M. et al. (2020). Estimating the specific yield of the Pampeano aquifer, Argentina, using superconducting gravimeter data. Hydrogeol J 28, 2303–2313. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02212-z>
- Torge, W. (1989). Gravimetry. Geodetic Activities Performed During the Period 1975-1978.



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Generación de mapas vTEC a tiempos casi real Contribución al estudio del “space weather” en Latinoamerica

Amalia Meza

Laboratorio MAGGIA (UNLP-CIC)
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata y CONICET, Argentina

ameza@fcaglp.unlp.edu.ar

El geoespacio y la baja atmósfera están constituidos por la atmósfera terrestre, la magnetosfera y el espacio donde transitan las emisiones solares que las afectan, como el viento solar (la corona solar en expansión) y las fulguraciones, entre otras. Se puede definir también como la región del espacio más próxima al planeta Tierra, lo suficientemente cerca como para afectar las actividades humanas y ser estudiada desde ella. Este espacio de trabajo es una región de interacción y de fronteras: interacción entre partículas atmosféricas o magnetosféricas y partículas o radiación solares, entre los campos magnéticos del Sol y la Tierra, entre el campo magnético terrestre y las partículas cargadas, entre campos eléctricos intensos producidos en procesos meteorológicos severos y la base de la alta atmósfera, entre otros; y fronteras entre regiones dominadas por diferentes patrones de flujo.

Existe un gran esfuerzo de la comunidad científica orientado al estudio de estos medios, ya sea para corregir los efectos anómalos en la propagación de las señales de radio, como para estudiarlos y/o predecirlos.

En esta última década, se ha encontrado un creciente reconocimiento de que las condiciones del medio ambiente (Climatología Espacial, del inglés Space Weather) impactan directamente sobre la vida de las personas y la infraestructura tecnológica en la que se apoya gran parte de sus economías. Con esto viene la necesidad de mejorar el conocimiento que la sociedad tiene sobre la Climatología Espacial. En este sentido, se ha avanzado mucho en la densificación de observatorios terrestres, así como en el lanzamiento de misiones espaciales dedicadas al estudio de los eventos geosféricos. Dado que la física involucrada en el estudio de eventos en el sistema Sol-Tierra es muy compleja la comprensión avanzada del clima espacial requiere de un enfoque interdisciplinario coordinado. En este mismo sentido se pronunció COSPAR (Committee On SPACe Research), organismo que en su reunión internacional del año 2013 estableció el programa “International Living with a Star” (Schrijver et al., 2015). En particular, el documento antes referido elabora una "hoja de ruta" para los próximos diez años (2015-2025), priorizando la cooperación internacional con el fin de avanzar en la comprensión de la Climatología Espacial desde el punto de vista científico. Por todo lo anterior, atendiendo a la problemática antes mencionada y basándonos en las directivas vigentes desde los organismos internacionales y en las recomendaciones que los mismos formulan, una de las tareas fundamentales son la representación de parámetros que caractericen la alta atmósfera basado en las observaciones de todo el sistema Sol-Tierra, el estudio de la respuesta del geoespacio a las variaciones solares, en particular del viento, que conducen a las corrientes inducidas geomagnéticamente intensas y tormentas ionosféricas (así como las perturbaciones abruptas de radiación) y en el desarrollo de índices y pronóstico de parámetro ionosféricos.

Nuestro Laboratorio de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA) perteneciente a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Universidad Nacional de La Plata y también centro asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, entre las tareas que realizamos se encuentran, aquellas vinculadas a la representación y estudio de la Climatología Espacial.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

El tema de presentación en esta escuela se centra en un breve repaso de los observables GNSS que vinculamos con la información atmosférica; en la descripción de la generación de mapas regionales del contenido de electrones totales verticales ionosféricos (VTEC) con una alta resolución espacial, destacando su gran importancia tanto para aplicaciones civiles como para la comunidad investigadora (Meza et al 2009, Meza & Fernández 2009, Meza et al 2012, Natali & Meza 2017). Estos mapas se basan en la infraestructura pública de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) en América del Sur, incorporando datos de múltiples constelaciones (actualmente GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou), empleando múltiples frecuencias y generando mapas VTEC de todo el continente con una latencia de solo unos minutos (Mendoza et al., 2019, Costa, J E R et al, 2020).

Referencias

- Costa, J. E. R., Nardin, C. M. D., Valdivia, J., Dasso, S., Gonzalez-Esparza, J. A., Meza, A., Natali, M. P., Mendoza, L. P. O. (2020) 17th Conference on Space Weather, Lessons Learned in Latin America from the WMO/ICAO Space Weather Services Initiative (Invited Presentation), AMS100, Boston, USA.
<https://ams.confex.com/ams/2020Annual/videogateway.cgi/id/520449?recordingid=520449>.
- Mendoza, LOP, Meza, A., Aragón Paz, J. M. (2019) A multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America. doi: 10.1029/2019SW002187, Space Weather.
- Meza, A., Fernandez L. I. (2009) Analysis of Ionospheric range delay corrections for navigation in South America Low Latitude region. Journal of GPS, Vol 8, N° 2, p. 165-174.
- Meza, A., Natali P., Fernandez L. (2012) Analysis of the winter and semiannual ionospheric anomalies in 1999-2009 based on GPS global IGS maps. Journal of Geophysical Research – Atmosphere, J. VOL. 117, A01319, doi:10.1029/2011JA016882.
- Meza, A.; van Zele, M. A., Rovira, M. (2009) Solar Flare effect on the geomagnetic field and ionosphere. Journal of Atmospheric and Solar terrestrial Physics (JASTP), Volume 71, Issue 12, p. 1322-1332, Pergamon, Elsevier Science.
- Natali, M. P., Meza, A. (2017) PCA analysis and vTEC climatology at midnight over mid-latitude regions. Earth, Planets and Space, Springer, vol. 69, p. 1 - 22. eissn 1880-5981.
- Schrijver, Carolus J., Kauristie, Kirsti; Aylward, Alan D.; Denardini, Clezio M. and 21 co-author more; Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015-2025 commissioned by COSPAR and ILWS (2015). Advances in Space Research, Volume 55, Issue 12, p. 2745-2807.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Efectos de carga estudiados a partir de la técnica GNSS

^{1,2}Mauricio Gende, ^{1,2}Victoria Graffigna, ^{1,2}Micaela Carbonetti y ^{1,3}Romina Galvan

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³Laboratorio GEO -AGGO (GEO -AGGO), Centro Científico Tecnológico CONICET - La Plata, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

mgende@fcaglp.unlp.edu.ar

Introducción

La técnica GNSS provee la oportunidad de realizar posicionamiento con una altísima precisión, lo que permite modelar entre otras cosas deriva de las placas tectónicas, fenómenos de subsidencia y levantamiento, las mareas terrestres y las deformaciones causadas por las cargas hidrológica, atmosférica, oceánica, criosférica.

Esto permite por un lado la posibilidad de estudiar señales sutiles de interés geofísico y por otro impone la necesidad de determinar un sistema de referencia muy exacto y consistente en el tiempo.

Esta presentación se centrará en el efecto de desplazamiento geométrico que producen las cargas de agua dulce sobre la corteza terrestre cuando se las observa con la técnica GNSS.

Este efecto ha sido estudiado en el pasado en regiones donde las variaciones de cargas presentan ciclos estacionales muy marcados y de importante magnitud. Por ejemplo en la zona de la cuenca del río Amazonas, donde los desplazamientos verticales tienen amplitudes de pico a pico mayores a los 6 centímetros y la carga amplitudes de pico a pico mayores al metro, medidas en altura de agua equivalente. En estos casos la anti-correlación está muy bien definida siendo superior al 90%.

Aquí se mostrarán dos trabajos recientes donde la señal de carga a detectar es más sutil y por lo tanto complicada de ser recobrada a partir de la técnica GNSS; no obstante mostraremos que este desafío fue resuelto eficientemente.

Los estudios tienen características espacio-temporales muy distintas. Por un lado se modela el efecto estacional de la carga debido a las cuencas de los ríos Paraná y Uruguay y sus afluentes. Una región donde la carga de agua dulce continental que se deposita es claramente menor a la región amazónica.

Aplicación del método PCA modificado para correlacionar datos hidrológicos con las variaciones observadas en las series de coordenadas geodésicas verticales de la red SIRGAS-CON.

Para llevarlo a cabo, se implementa el método de Análisis de Componentes Principales Modificado, que permite encontrar características espaciales predominantes de los datos de entrada así como su variabilidad temporal.

El algoritmo efectúa una descomposición de las series de tiempo en un conjunto menor de vectores que optimizan la descripción de la mayor parte de la varianza de los datos, y nos da una estimación porcentual de la contribución de cada patrón de variabilidad a la señal original. La modificación incorporada respecto del método clásico permite trabajar con series que presentan discontinuidades o datos faltantes. La anticorrelación entre los datos de carga y geodésicos superó el 60 %, en toda el área de estudio.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Se calculan a su vez mapas de correlación homogénea asociadas a las componentes principales para analizar los patrones espaciales característicos y su evolución temporal. Esto evidenció que la región de estudio presentaba dos patrones de comportamiento diferenciados entre la zona norte y la sur, que están directamente asociados con los patrones de precipitaciones predominantes en el área.

Recobrando una señal geofísica utilizando GPS en la región del Río de La Plata

Por otro lado, se modela el efecto de carga que produce un evento extremo en el Río de La Plata, una onda de tormenta de pocas horas de duración que incrementa el volumen de agua que se posa sobre el estuario del río. Para ello, se modifica el código de un programa de posicionamiento puntual preciso parametrizando el problema para poder recobrar de una manera indirecta la variación de la altura, una cantidad que no puede estimarse de manera certera en forma directa debido a lo corto y tenue del fenómeno: una variación subdiaria de muy pocos centímetros de amplitud. Se muestra como se resuelve con éxito la estimación de la deformación por carga y surge como resultado conexo la importancia de que el receptor GNSS cuente con un reloj atómico y cómo contando con él es posible decorrelacionar la estimación troposférica de la de altura.

Referencias

- Bailey, S. (2012) Principal Component Analysis with Noisy and/or Missing Data. The Astronomical Society of the Pacific.
- Bevis, M. (2005) Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and earth's elastic response. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2005gl023491>.
- Björnsson, H., Venegas, S. A. (1997) A manual for EOF and SVD. Analysis of climatic data. McGill University.
- Blewitt, G. (2001) A new global mode of earth deformation: seasonal cycle detected. *Science* 294(5550):2342–2345. <https://doi.org/10.1126/science.1065328>.
- Collilieux, X., van Dam, T., Ray, J., Coulot, D., Métivier, L., Altamimi, Z. (2012) Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters. *J. Geodesy* 86(1):1–14. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0487-6>.
- D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E., Pousa, J. L. (2008) Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *J. Coast. Res.* 1:260–265. <https://doi.org/10.2112/05-0588.1>.
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2003) A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, Vol270 Is. 1–2, Pag 105-134.
- Fratepietro, F., Baker, T. F., Williams, S. D. P., Camp, M. V. (2006) Ocean loading deformations caused by storm surges on the northwest European shelf. *Geophys. Res. Lett.* 33(6):1–4. <https://doi.org/10.1029/2005gl025475>.
- Geng, J., Williams, S. D., Teferle, F. N., Dodson, A. H. (2012) Detecting storm surge loading deformations around the southern North Sea using subdaily GPS. *Geophys. J. Int.* 191(2):569–578.
- Nordman, M., Virtanen, H., Nyberg, S., Mäkinen, J. (2015) Non-tidal loading by the Baltic Sea: comparison of modelled deformation with GNSS time series. *Geo. Res. J.* 7:14–21
- Oreiro, F. A., Wziontek, H., Fiore, M. M. E., D'Onofrio, E. E., Brunini, C. (2018) Non-tidal ocean loading correction for the Argentinean German geodetic observatory using an empirical model of storm surge for the Río de La Plata. *Pure Appl Geophys* 175(5):1739–1753. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1651-6>.
- Weinbach, U., Schön, S. (2015) Improved GPS-based coseismic displacement monitoring using high-precision oscillators. *Geophys. Res. Lett.* 42:3773–3779. <https://doi.org/10.1002/2015GL063632>.
- Zizhu, F., Ergen, L., Baogen, X. (2011) Weighted principal component analysis. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg.



Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Zou, R., Freymueller, J. T., Ding, K., Yang, S., Wang, Q. (2014) Evaluating seasonal loading models and their impact on global and regional reference frame alignment. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119(2):1337–1358. <https://doi.org/10.1002/2013jb010186>.



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**



Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie