

HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

Claudia Tocho ^{1, 2, 3}

ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

²Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)

³Member-at-Large GGOS Coordinating Board

RESUMEN

Mi intervención en la mesa redonda: Contribución a la Historia, Presente y Futuro de la Geodesia en la Argentina, estuvo centrada en presentar la descripción científica realizada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG¹) acerca de la implementación del Marco de Referencia Geodésico Mundial (GGRF²) para el desarrollo sostenible adoptado en la Resolución A/RES/69/266 en la Asamblea General de las Naciones Unidas (UN³) el 26 de febrero de 2015 (https://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_S.pdf).

ESTRUCTURA DE LA ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE GEODESIA

La Asociación Internacional de Geodesia (IAG) es una de las ocho asociaciones científicas que conforman la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG⁴). La IAG es la organización científica responsable del avance de la Geodesia a nivel mundial. Su estructura se compone de 4 comisiones, 2 comités intercomisiones, un proyecto, servicios técnicos (tanto geométricos y generales así como también los servicios gravimétricos) y del Sistema de Observación Geodésico Global (GGOS⁵). GGOS se inició en julio de 2003 con el fin de monitorear el Sistema Tierra y el cambio global, y es la componente fundamental dentro de la estructura de la IAG para la implementación de la Resolución de las Naciones Unidas, sobre el *Marco de Referencia Geodésico Mundial para el Desarrollo Sostenible*, ya que la IAG y GGOS realizan acciones importantes dentro del Subcomité de Geodesia del Comité de Expertos sobre Gestión Mundial de Información Geoespacial de las Naciones Unidas (UN-GGIM⁶). GGOS también interactúa con la Unión Astronómica Internacional (IAU⁷).

Se sugiere visitar los sitios webs: <https://www.iugg.org/>; <https://www.iag-aig.org/>; <https://ggos.org/>

DESCRIPCIÓN CIENTÍFICA DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

¹ International Association of Geodesy

² Global Geodetic Reference Frame

³ United Nations

⁴ International Union of Geodesy and Geophysics

⁵ Global Geodetic Observing System

⁶ UN Committee of Experts on Global Geospatial Information Management

⁷ International Astronomical Union

En abril de 2016, la IAG escribe un documento en donde describe cuáles son los fundamentos científicos sobre los que debe implementarse el Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF⁸) para cumplir con los objetivos previstos por Naciones Unidas. El documento se puede descargar de: <https://office.iag-aig.org/doc/5d886c7c1bf43.pdf>.

Concepto General

El sistema de referencia geodésico global que permita la medición y monitoreo simultáneo, consistente y preciso de la geometría de la Tierra, su campo de gravedad y su orientación en el espacio exterior se denomina Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS⁹). La realización precisa del GGRS es el GGRF, el cual es indispensable para generar información geoespacial confiable, requerida para estudiar los cambios que ocurren en el Sistema Tierra (monitoreo del cambio global, mitigación de desastres naturales, estudios del cambio climático global, aumento del nivel del mar, entre otros).

El GGRF se basa en observaciones geodésicas, centros de datos, centros de análisis, así como centros combinados y de productos geodésicos. Si bien el concepto general del GGRF se centra predominantemente en cuestiones técnicas, operativas y de infraestructura, también se deben considerar las actividades de investigación e innovación asociadas. La disponibilidad permanente de infraestructura geodésica de última generación y personal científico y técnico para generar productos geodésicos y aportar a los servicios de la IAG es crucial para lograr un GGRF sostenible.

Las bases para la realización del GGRF son las múltiples infraestructuras de observación geodésica. GGOS clasifica a la arquitectura de observación en 5 niveles:

- Nivel 1: infraestructura geodésica y gravimétrica terrestre.
- Nivel 2: misiones satelitales de órbita terrestre baja (LEO¹⁰) con alturas entre 180 y 2000 km.
- Nivel 3: misiones satelitales de órbita terrestre alta: (MEO¹¹ y GEO¹²) con alturas hasta 36.000 km.
- Nivel 4: objetos planetarios y satélites naturales como la Luna.
- Nivel 5: objetos extragalácticos (p. ej. quásares).

Estos cinco niveles están conectados por muchos tipos de observaciones de manera compleja para formar un sistema integrado de observación geodésica. Con las técnicas espaciales las observaciones son globales y regionales, mientras que, con las técnicas terrestres, las observaciones se utilizan principalmente para la interpolación en el espacio y el tiempo, y así registrar características locales específicas.

⁸ Geodetic Global Reference Frame

⁹ Global Geodetic Reference System

¹⁰ Low Earth Orbiter

¹¹ Medium Earth Orbiter

¹² Geostationary Earth Orbiter

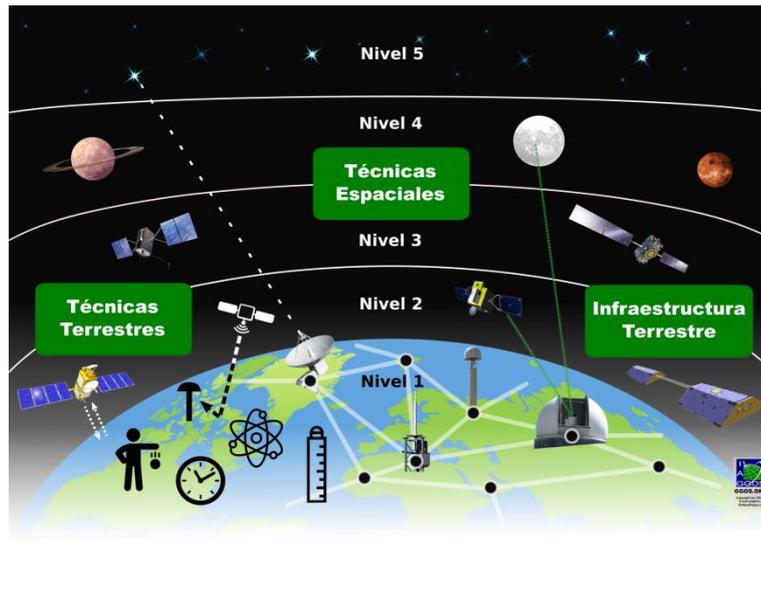


Figura 1. Martin Sehnal (2022). Distintas observaciones geodésicas que proveen los fundamentos para la determinación y mantenimiento del GGRF. <https://ggos.org/obs/>

SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

El concepto general del Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS) se basa en Die Figur der Erde (La figura de la Tierra) de Bruns (1878).

El GGRS incluye una componente terrestre y una componente celeste. La componente terrestre es una referencia común para describir la geometría y el campo de gravedad terrestre en cualquier momento. En la Figura 2, se observa que la posición de un punto P sobre la superficie terrestre debe describirse mediante la ecuación (1):

$$P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{g}) = P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, -\Delta\mathbf{W}) = P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, -\partial\mathbf{W}/\partial\mathbf{H}), \quad (1)$$

donde \mathbf{X} es la coordenada geocéntrica cartesiana, \mathbf{W} el valor de potencial real de gravedad terrestre, \mathbf{g} el vector de gravedad (gradiente del potencial de gravedad terrestre) y \mathbf{H} la altura física.

El Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS¹³) provee la base celeste al GGRS para describir la orientación de la Tierra en el espacio exterior en cualquier momento.

La vinculación entre la componente terrestre y la componente celeste está dada por los parámetros de orientación terrestre (EOPs¹⁴) que también permiten relacionar cantidades gravimétricas con geométricas.

¹³ International Celestial Reference System

¹⁴ Earth Orientation Parameters

- X se determina con técnicas geodésicas espaciales (p. ej. GNSS) y se refiere al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF¹⁵).
- La altura física H es la diferencia $-\Delta W$ entre el potencial $W(P)$ del campo de gravedad terrestre en el punto P considerado y el potencial de gravedad del geode W_0 .
- La unidad de tiempo es el segundo y la unidad de longitud es el metro en el Sistema Internacional (SI).
- Geometría y gravedad son funciones del tiempo \dot{X} , \dot{W} , \dot{H} & \dot{g} .
- Se requieren parámetros fundamentales, convenciones para los modelos sean consistentes tanto para la geometría y gravedad.

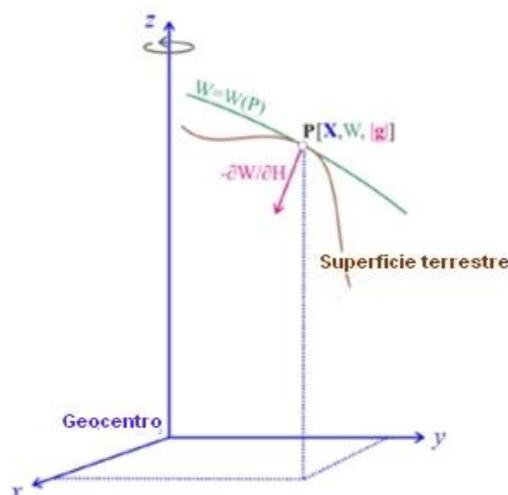


Figura 2: Modificado de Sánchez (2020)
https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Webinar_20200625_Sanchez_IHRS.pdf

MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

El Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF) es la realización del Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS). Se materializa a través de puntos físicos en la superficie de la Tierra, satélites con órbitas cercanas a la Tierra y objetos celestes, junto con parámetros que describen la geometría y la gravedad a lo largo del tiempo.

Los puntos sobre la superficie terrestre tienen cobertura global, con densificaciones de la infraestructura geodésica a nivel regional y nacional.

Las estaciones del GGRF generalmente comprenden:

- Observatorios geodésicos fundamentales que emplean todas las técnicas geodésicas geométricas espaciales (VLBI¹⁶, SLR¹⁷, GNSS¹⁸, y DORIS¹⁹), colocalizadas con técnicas gravimétricas (gravímetros absolutos, superconductores, atómicos), permitiendo la conexión entre X , W y g y realización del tiempo (relojes de referencia);
- Otras estaciones geodésicas que incluyan mareógrafos de referencia, puntos de referencia de altura y mediciones de gravedad, complementadas con técnicas geodésicas espaciales.

El GGRF es un marco de referencia geodésico integrado, que comprende el Marco de Referencia Celeste, el Marco de Referencia Terrestre, el Marco de Referencia de Altura y el Marco de Referencia de Gravedad (Figura 3).

¹⁵ International Terrestrial Reference Frame

¹⁶ Very Long Baseline interferometry

¹⁷ Satellite Laser Ranging

¹⁸ Global Navigation Satellite System

¹⁹ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite



Figura 3. Martin Sehnal (2022). Marcos de referencia. <https://ggos.org/products/>

Todas las estaciones GGRF deben:

- Operar en forma continua, a largo plazo, para garantizar la estabilidad del GGRF;
- Estar equipadas con tecnología de observación de última generación para producir observaciones de alta calidad;
- Estar monitoreadas en forma continua para detectar deformaciones de la superficie de la Tierra; y
- Estar vinculadas a redes verticales nacionales para la unificación de los sistemas de alturas existentes.

IMPLEMENTACIÓN DEL GGRF A NIVEL GLOBAL Y PARTICIPACIÓN DE ARGENTINA

El GGRF es un marco de referencia geodésico que incorpora el Marco de Referencia Internacional Celeste (ICRF²⁰), el Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF²¹), el Marco de Referencia Internacional de Altura (IHRF²²) y el Marco de Referencia Internacional de Gravedad (IGRF²³). Los dos últimos fueron introducidos con las Resoluciones No. 1 y No. 2 de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) durante la Asamblea General de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG) realizada en Praga en 2015 (Drewes et al., 2016).

La definición, materialización y mantenimiento de un sistema de referencia de altura global, unificado, físico (dependiente del campo de gravedad terrestre), exacto y bien definido (IHRF) es, hoy en día, uno de los objetivos de la Geodesia (Sánchez et al., 2021). En este sentido, junto al Geof. Ezequiel D. Antokoletz participamos activamente en los siguientes grupos de trabajo:

²⁰ International Celestial Reference Frame

²¹ International Terrestrial Reference Frame

²² International Height Reference Frame

²³ International Gravity Reference Frame

- JWG²⁴ 0.1.2. Working Group on Strategy for the Realization of the International Height Reference System (IHRF).
Periodo 2015-2019
Chair: Laura Sánchez (Alemania)
- JWG 0.1.3: Implementation of the International Height Reference Frame (IHRF).
Periodo 2019-2023 (Poutanen M. y S. Rózsa, 2020)
Chair: Laura Sánchez (Alemania), Lead of the GGOS Focus Area Unified Height System
Vice-chair: Riccardo Barzaghi (Italia), Chair of the International Gravity Field Service

El establecimiento de un nuevo sistema de referencia gravimétrico (IGRS) es otro de los principales objetivos de la IAG por lo que también participamos activamente en el

- JWG 2.1.1 Establishment of a global absolute gravity reference system.
Periodo 2015-2019
Periodo 2019-2023 (Poutanen M. y S. Rózsa, 2020)
Chair: Hartmut Wziontek (Alemania)
Vice-chair: Sylvain Bonvalot (Francia)

para lograr el 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 (Wziontek et al., 2021).

El Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO²⁵), cuenta con la capacidad y la infraestructura para participar activamente en la materialización del IHRF y del IGRS. En AGGO, se garantiza la conexión entre el sistema de referencia geométrico (coordenadas geocéntricas cartesianas) con los sistemas de referencia físicos (altura y gravedad).

Por otra parte, la combinación de las observaciones del gravímetro superconductor y el gravímetro absoluto instalado en el Laboratorio de Gravimetría 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 primera estación de referencia en América Latina y el Caribe con facilidades para la comparación de gravímetros absolutos, y vinculada al ITRF y al IHRF (Tocho et al., 2020).

Por último, quisiera mencionar que desde mayo de 2021 fui electa Member-at-Large del GGOS Coordinating Board, y que las tareas que realiza GGOS en la implementación del GGRF son:

- Organizar los servicios (gravimétricos y geométricos) de la IAG con un alto nivel científico y técnico;
- Apoyar el desarrollo de tecnologías y productos geodésicos sobre la base de compartir datos, productos, estándares y convenciones geodésicas;
- Brindar apoyo científico a todas las organizaciones científicas, agencias geodésicas nacionales y Estados Miembros, en materia geodésica;
- Desarrollar y mejorar teorías y metodologías para la implementación del GGRF;

²⁴ Joint Working Group

²⁵ Argentinean-German Geodetic Observatory

- Ayudar a la divulgación de la geodesia para que sea más comprensible a la sociedad.

Por último, cabe resaltar que el Marco de Referencia Geodésico Global como el GGRF no puede ser implementado por una sola persona, o una sola entidad o un solo país. La implementación del GGRF solo es posible bajo una cooperación internacional global, fuerte y estructurada como la construida bajo la Asociación Internacional de Geodesia.

REFERENCIAS

- Antokoletz E.D., Wziontek H., C.N. Tocho, R. Falk. 2020. 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>
- Bruns H. 1878). *Die Figur der Erde*. Publication des Königl. Preussischen Geodätischen Instituts, Berlin.
- Drewes H, F. Kuglitsch, J. Ádám, S. Rózsa. 2016. Geodesist's Handbook 2016, *J Geod* 90, 907.
- Poutanen M. y S. Rózsa. 2020. The Geodesist's Handbook 2020. *J Geod* 94, 109. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01434-z>
- Sánchez L., J. Ågren, J. Huang, Y.M. Wang, J. Mäkinen J., R. Pail, R. Barzaghi, G.S. Vergos, K. Ahlgren, Q. Liu. 2021. Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHR). *Journal of Geodesy*, 95(3). <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>
- Tocho C.N., Antokoletz E.D., Piñón D.A. (2020) Towards the Realization of the International Height Reference Frame (IHRF) in Argentina. In: *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2020_93
- Wziontek H., S. Bonvalot, R. Falk, G. Gabalda, J. Mäkinen, V. Pálinkáš, A. Rülke, L. Vitushkin. 2021. Status of the International Gravity Reference System and Frame. *J Geod* 95, 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>