

Sistema Internacional de Alturas IHRS (International Height Reference System)

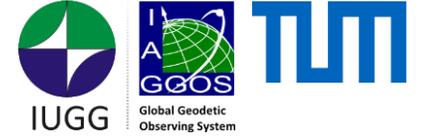
Laura Sánchez (lm.sanchez@tum.de)

Vicepresidente de GGOS

Coordinadora de GGOS Focus Area “Unified Height System”

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Technische Universität München (DGFI-TUM)
Alemania

Motivación



Implementación de un sistema de referencia geodésico global que permita la **medición y monitoreo simultáneos, consistentes y precisos** de

- la geometría de la Tierra
- el campo de gravedad terrestre, y
- la orientación de la Tierra en el espacio exterior.

Dicho sistema se denomina **Global Geodetic Reference System (GGRS)** y su realización es el **Global Geodetic Reference Frame (GGRF)**

- Viabilidad gubernamental mediante la Resolución A/69/L.53 (Feb 2015) de la Organización de las Naciones Unidas para un “**Marco de referencia geodésico para el desarrollo sostenible**” (marco = infraestructura)
- Viabilidad científica y técnica a través de la **Asociación Internacional de Geodesia** (IAG: International Association of Geodesy) y su **Sistema Geodésico de Observación Global** (GGOS: Global Geodetic Observing System)
- En Geodesia, sistema = definición (teoría, constantes y convenciones), marco = realización (materialización) de un sistema de referencia.

Motivación

El GGRF incluye:

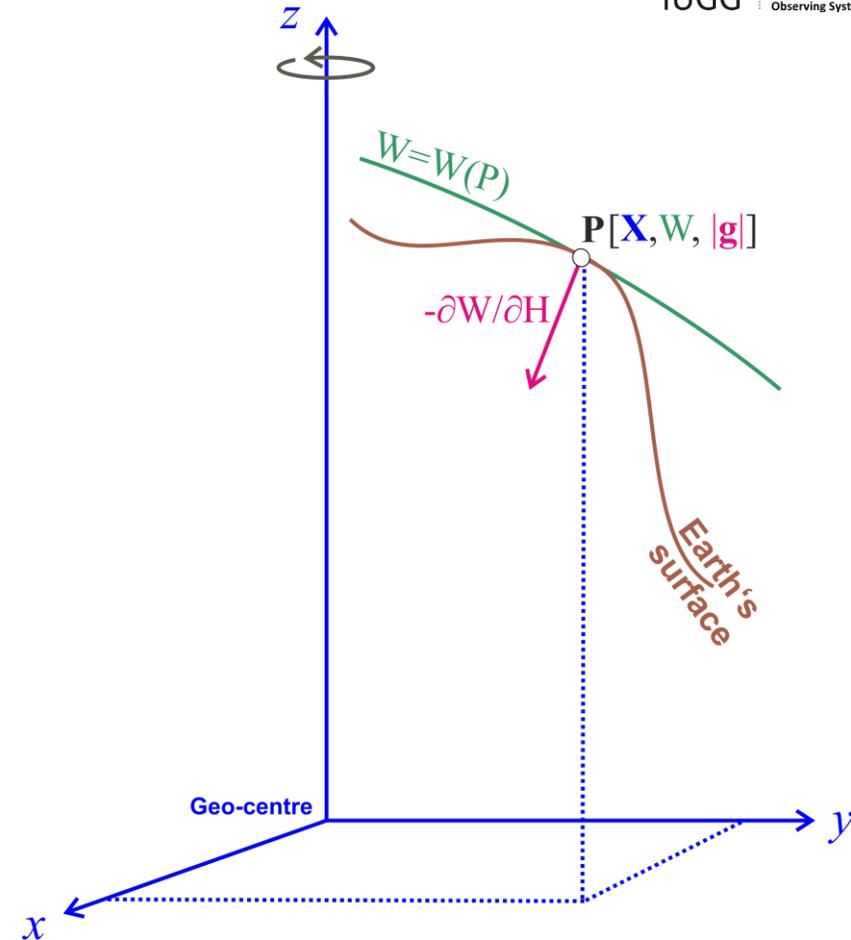
- Coordenadas geocéntricas cartesianas \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$
- Vector de gravedad \mathbf{g} , $\dot{\mathbf{g}}$
- Potencial del campo de gravedad terrestre W , \dot{W}
- Alturas físicas H , \dot{H}

La posición (o trayectoria) de puntos sobre la superficie terrestre debe describirse mediante:

$$W(\mathbf{X}), P\{W, \mathbf{X}\}, \text{ o } P\{\mathbf{X}, W, \mathbf{g}\} = P\{\mathbf{X}, W, -\nabla W\}$$

con $g = -\partial W / \partial H$

\mathbf{X} se determina con técnicas geodésicas espaciales (p.ej. GNSS) y se refiere al International Terrestrial Reference Frame (ITRF): un marco global unificado de alta precisión (\sim cm), con densificaciones regionales (p.ej. SIRGAS, EPN, etc.) y nacionales (p.ej. RAMSAC, RBMC, REGME, MAGNA, etc.)



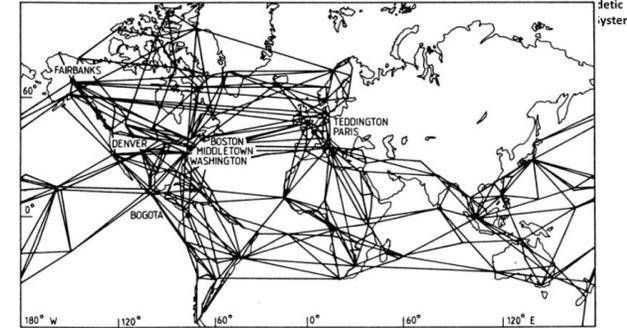
Ver: IAG (2017) *Description of the Global Geodetic Reference Frame*.
Position paper adopted by the IAG Executive Committee in April 2016. J
Geod 91,113–116, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0994-6>.

Sistemas de referencia utilizados en geodesia física



1) Gravimetría terrestre (aérea, marina): **International Gravity Standardisation Net 1971 (IGSN71)**

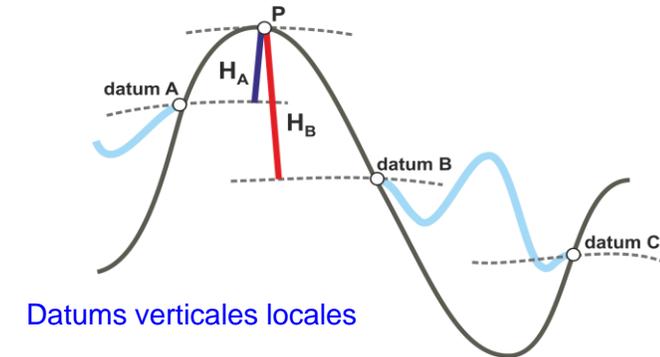
- Precisión: $1\mu\text{ms}^{-2}$ ($100\mu\text{Gal}$)
- 10 estaciones absolutas de gravedad
- 1,200 observaciones pendulares y 24,000 relativas
- Corrección con respecto al sistema Potsdam -14 mGal



IGSN71 (Morelli et al. 1976)

2) Alturas físicas: más de **100 datums verticales**

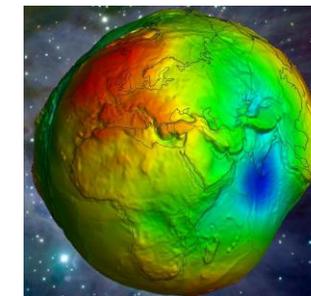
- Niveles de referencia diferentes (varios [dm] de discrepancia);
- Diferentes tipos de alturas (normales, ortométricas, etc.);
- Omisión de cambios verticales a través del tiempo;
- Baja precisión en la combinación de h-H-N



Datums verticales locales

3) Modelos de gravedad (cuasiestacionarios o estáticos)

- Precisión de [cm] en longitudes de onda larga (~ 100 km) gracias a gravimetría satelital, pero **más de 70 modelos globales desde 2008**
- Precisión en longitudes de onda corta depende de la disponibilidad de gravimetría terrestre y modelos precisos de terreno
- Métodos diferentes de cálculo, producen resultados diferentes (con discrepancias hasta [dm]).



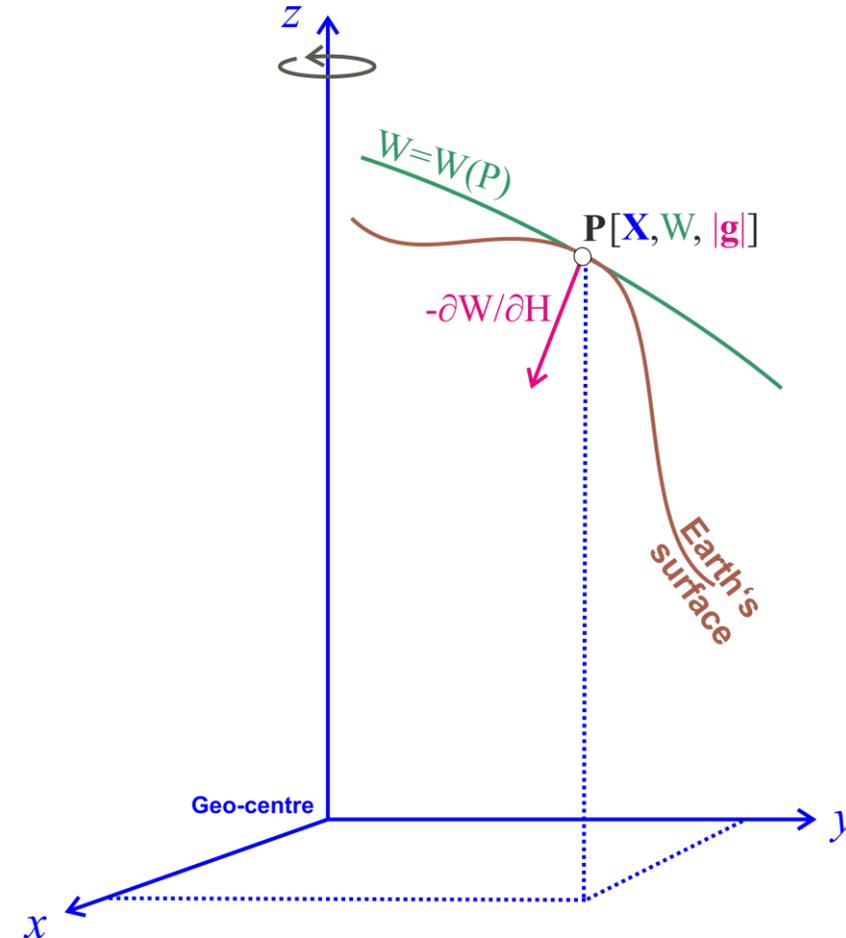
Modelo EIGEN-6C4, ICGEM

Resoluciones 2015 de la Asociación Internacional de Geodesia

Así como \mathbf{X} se determina en un marco preciso global de referencia (el ITRF), g , W y H deben determinarse con respecto a un **marco de referencia (física) unificado, global y preciso** → La implementación del GGRF demanda la definición y realización de un sistema de referencia físico (**physical reference system**) de alta precisión y cobertura global.

El primer paso en esa dirección es la expedición de dos resoluciones de la IAG durante la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) en 2015:

- 1) **Definición y realización del International Height Reference System (IHRIS),**
- 2) **Implementación del International Gravity Reference System (IGRS) con base en mediciones absolutas de gravedad (para reemplazar el IGSN71).**



Ver: Drewes et al.: The Geodesist's Handbook 2016, Journal of Geodesy. 2016.

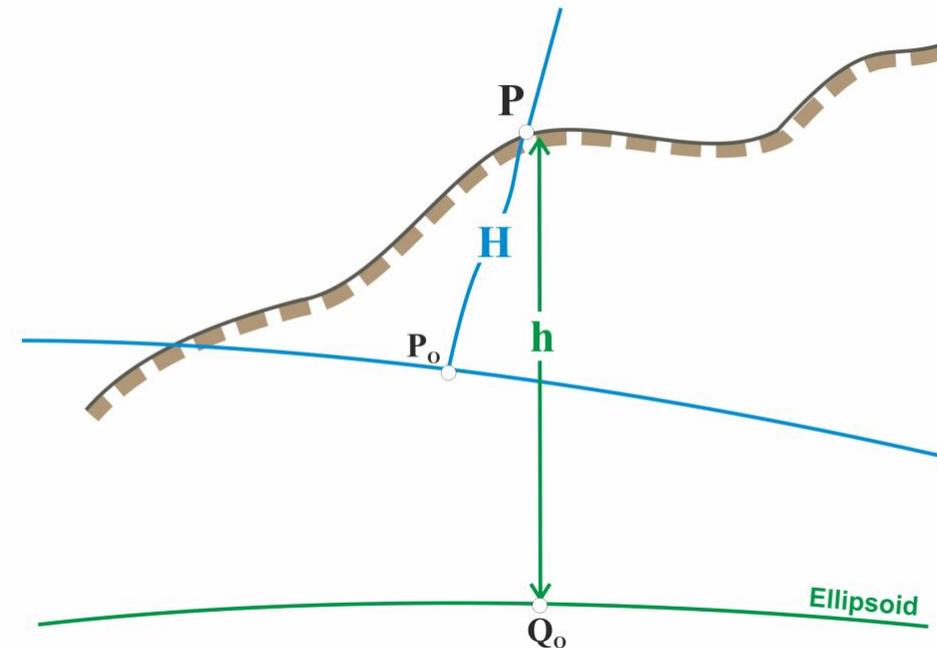
Sistemas de alturas o sistemas verticales de referencia

Un sistema de alturas se compone básicamente de

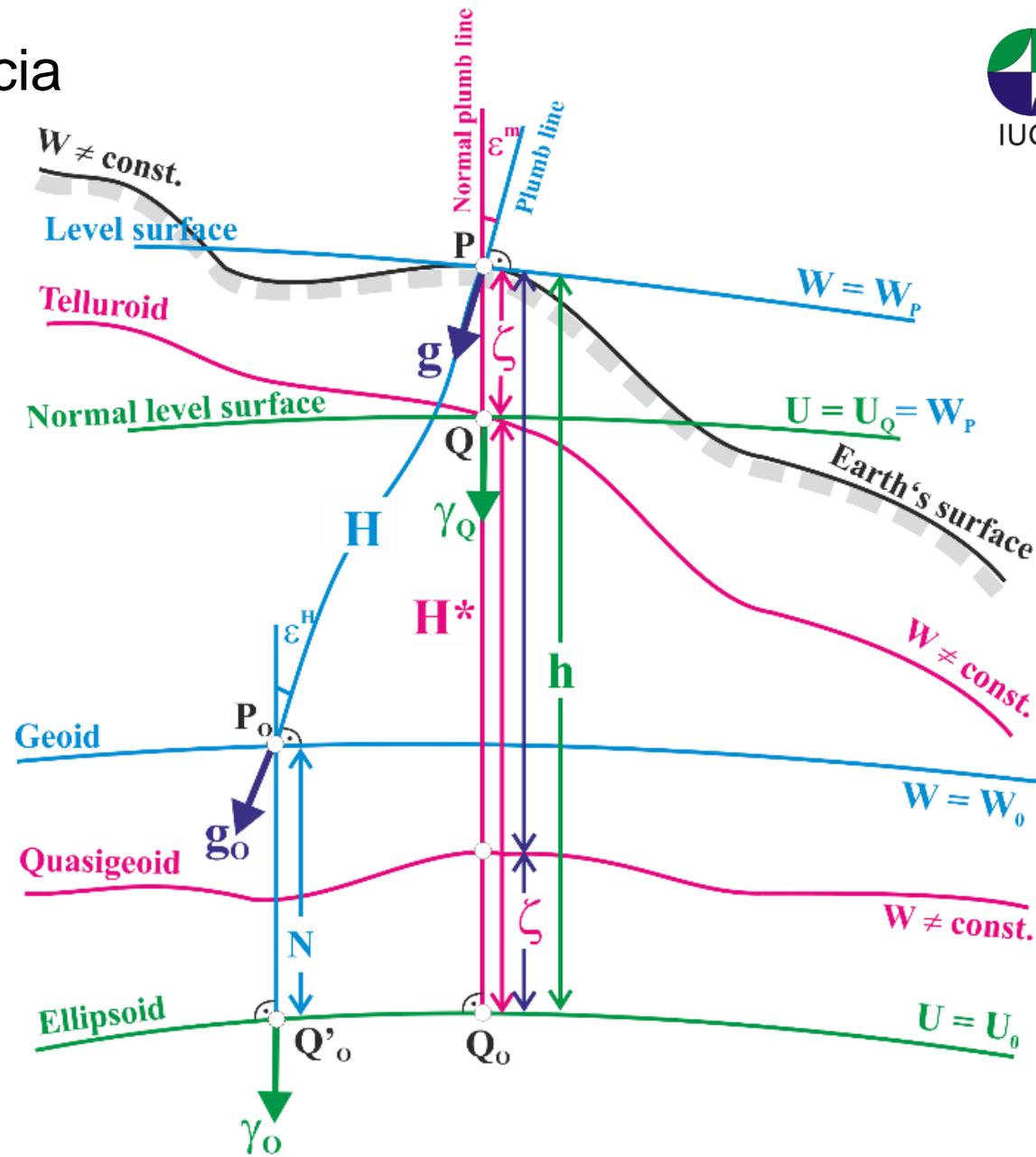
- 1) Una **superficie de referencia** o nivel de altura cero (datum vertical)
- 2) Una **coordenada vertical**, es decir una altura de tipo específico.

La realización (materialización) del sistema de alturas es un conjunto de puntos materiales (red), cuyas alturas son del tipo definido en (2) y se refieren al datum definido en (1).

Si la superficie de referencia y la coordenada vertical dependen del campo de gravedad terrestre, se habla de un **sistema de alturas físicas** (p.ej. alturas ortométricas y el geoide, o alturas normales y el cuasigeoide); si no dependen del campo de gravedad, se habla de un **sistema de alturas geométricas** (p.ej. alturas elipsoidales y un elipsoide de referencia).



Alturas y superficies de referencia



International Height Reference System (IHR)

Resolución IAG No. 1, Praga, julio 2015

- 1) Coordenada vertical son **diferencias de potencial** con respecto a un valor W_0 convencional:

$$C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$$

$$W_0 = \text{const.} = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$$

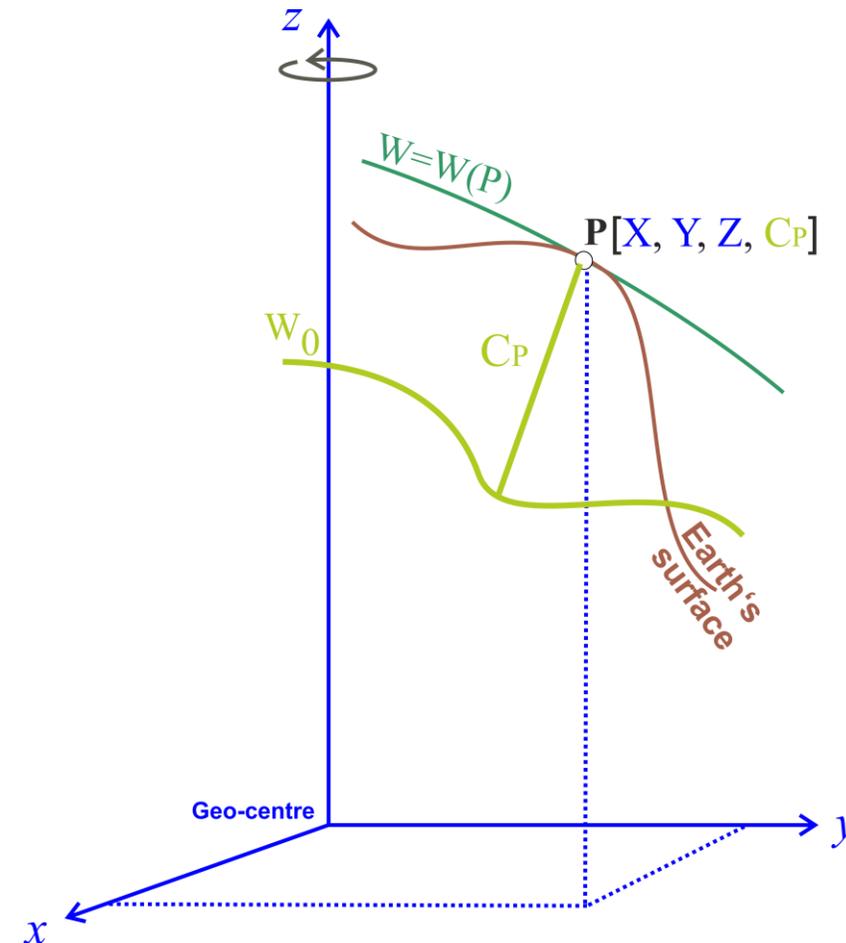
- 2) La posición de P se define en el ITRF

$$\mathbf{X}_P (X_P, Y_P, Z_P); \text{ i.e., } W(P) = W(\mathbf{X}_P)$$

- 3) La determinación de $\mathbf{X}(P)$, $W(P)$ (o $C(P)$) incluye sus cambios a través del tiempo, $\dot{\mathbf{X}}(P)$, $\dot{W}(P)$ (o $\dot{C}(P)$).

- 4) Coordenadas en **mean-tide system / mean (zero) crust.**

- 5) Las unidades son **metro** y **segundo** (SI).



Ver: Ihde J. et al.: *Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHR)*. *Surv Geophys* 38(3), 549-570, 10.1007/s10712-017-9409-3, 2017

Sánchez L. et al.: *A conventional value for the geoid reference potential W_0* , *J Geod*, 90(9): 815-835, 10.1007/s00190-016-0913-x, 2016.

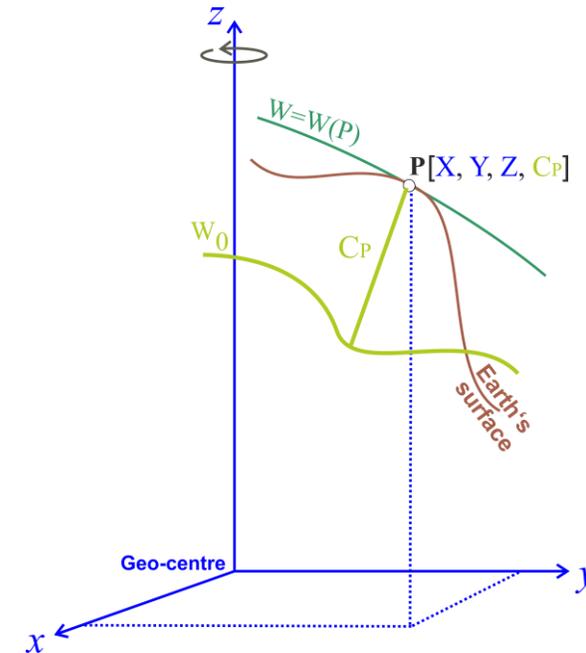
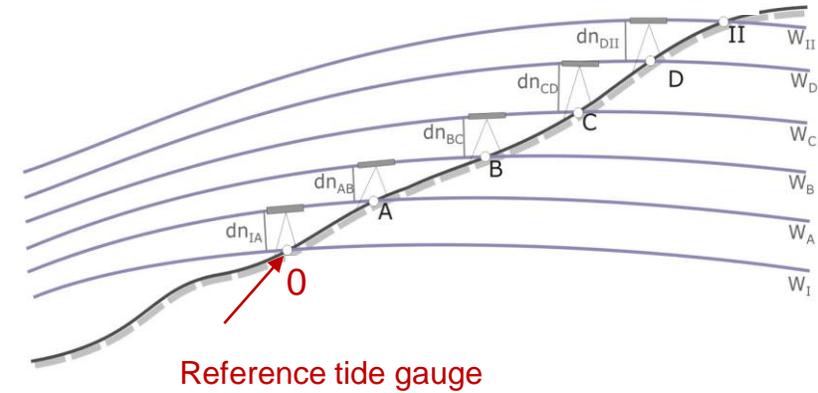
Coordenada vertical primaria: números geopotenciales

- Con nivelación, se determinan **números geopotenciales** con respecto a un datum vertical local

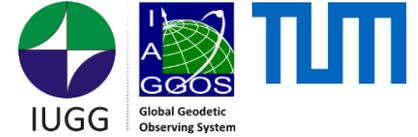
$$H_P^{local} = \frac{W_0^{local} - W_P}{\hat{g}} = \frac{C_P^{local}}{\hat{g}} ;$$

- Con el IHR5, el objetivo es determinar **números geopotenciales 'globales'** con respecto a un datum convencional global definido por un valor de referencia W_0 . Como W_0 es una convención, conocido e invariable, la coordenada vertical primaria es el **valor de potencial W_P** :

$$-\Delta W_P = C_P = W_0 - W_P$$



Realización del IHRS



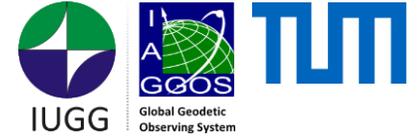
Un marco de referencia materializa un sistema de referencia de dos maneras:

- físicamente, mediante el establecimiento de puntos de referencia materializados con pilares o instrumentos de observación,
- matemáticamente, mediante la determinación de coordenadas asociadas al sistema de referencia.
- Las coordenadas de los puntos de referencia se obtienen a partir de las mediciones pero siguiendo la definición del sistema de referencia.

La implementación del IHRS requiere principalmente:

- 1) Una red global de referencia
- 2) La determinación de coordenadas precisas (W , \dot{W} , \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$) en las estaciones de referencia
- 3) Estándares, convenciones y procedimientos detallados para asegurar que la realización (IHRF) obedece estrictamente la definición (IHRS)
- 4) Una infraestructura operacional y organizacional que garantice el mantenimiento, la continuidad y la disponibilidad del IHRF a largo plazo.

Configuración de la red de referencia del IHRF



1) Jerarquía:

- Una red global → distribución homogénea con
- Una red principal o primaria (**core network**) → para asegurar estabilidad y perdurabilidad a largo plazo
- **Densificaciones regionales y nacionales** → para asegurar acceso al marco de referencia desde cualquier lugar

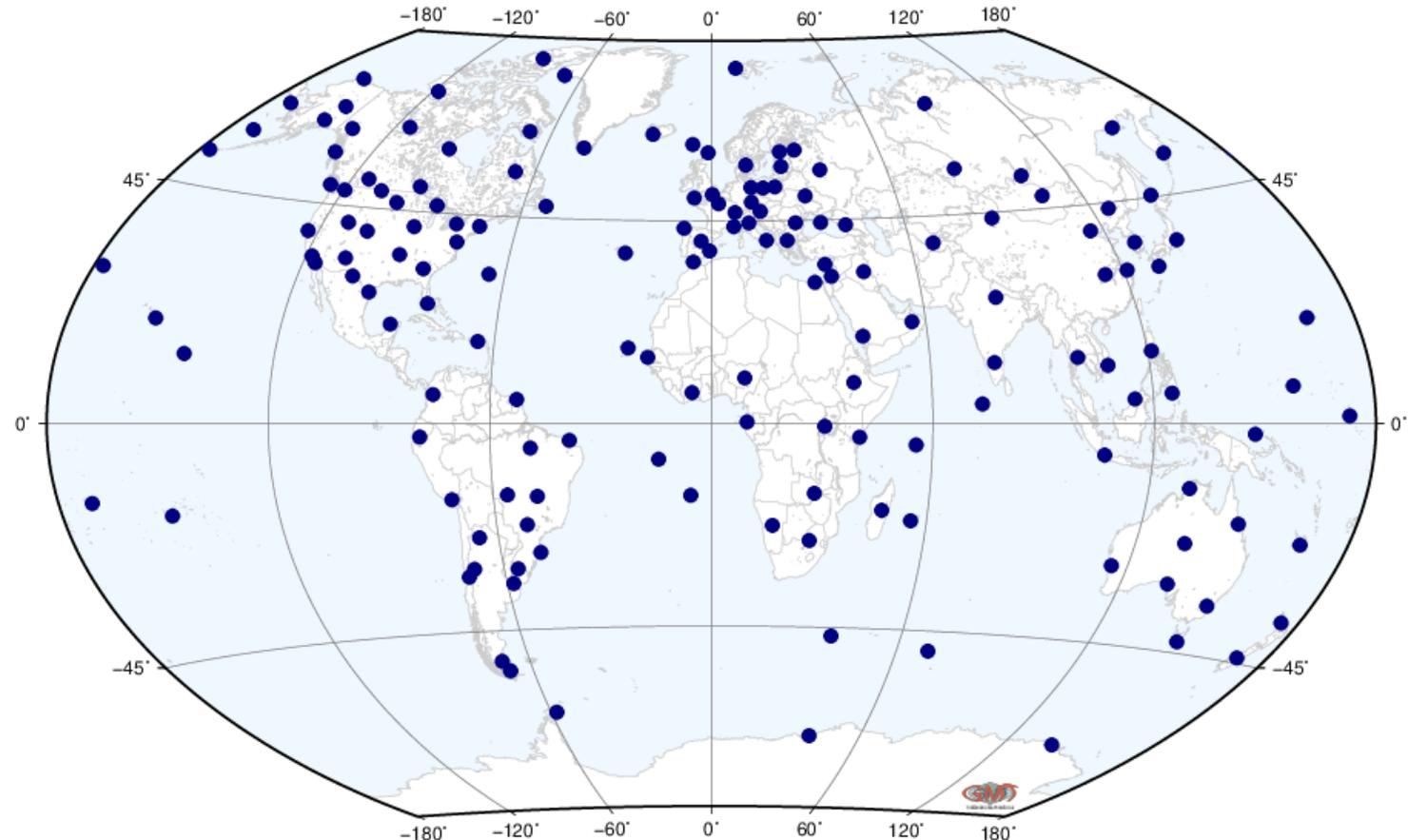
2) Co-localizada con:

- **Observatorios geodésicos fundamentales** → conexión directa entre \mathbf{X} , W , g y realización del tiempo (relojes de referencia);
- **Estaciones GNSS de operación continua** → para detectar deformaciones del marco de referencia (preferencia por estaciones ITRF y sus densificaciones regionales SIRGAS, EPN, APREF, etc.);
- **Mareógrafos de referencia y redes verticales nacionales** → para vincular los sistemas de alturas existentes al IHRF;
- Estaciones de **International Gravity Reference Frame - IGRF** (see IAG Resolution 2, Prague 2015).

3) Requerimiento primordial: **disponibilidad de gravimetría terrestre (aérea) alrededor de las estaciones para la determinación precisa de valores de potencial W .**

Red primaria (core network) del IHRF (~170 estaciones)

- Selección de estaciones coordinada por **GGOS-FA Unified Height System** con el apoyo de **GGOS Bureau of Networks and Observations**, el **Bureau Gravimétrique International** (estaciones absolutas de gravedad) y las **subcomisiones regionales de la IAG** para marcos de referencia y modelado del geoide.
- No es una “red muerta” pueden agregarse o retirarse estaciones según necesidades específicas.
- Esta red primaria debe ser **densificada mediante redes regionales y nacionales**.



Consideraciones sobre las coordenadas IHRS/IHRF



- 1) El IHRS/IHRF está basado en la combinación de
 - una componente geométrica dada por el vector de coordenadas \mathbf{X} en the ITRS/ITRF y
 - una componente física dada por la determinación del potencial de gravedad W en la posición \mathbf{X} .
- 2) La determinación de \mathbf{X} se hace de acuerdo con las convenciones del IERS (International Earth Rotation and Reference Systems' Service); por ahora en la determinación del IHRF no se hacen mayores consideraciones al respecto y \mathbf{X} se acepta como es.
- 3) De acuerdo con los objetivos de GGOS, la precisión esperada para W es
 - Posiciones: $\approx \pm 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (~ 3 mm)
 - Velocidades: $\approx \pm 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-2}/\text{a}$ (~ 0.3 mm/a)
- 4) Por el momento, el objetivo es alcanzar una precisión de $\pm 1 \times 10^{-1} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (~ 1 cm)
- 5) Las coordenadas IHRF incluyen la determinación (o modelado) de variaciones a través del tiempo. Por el momento, solo se está considerando una solución estática (estacionaria).

Posibilidades para la determinación de coordenadas IHRF

1) Modelos globales de gravedad de alta resolución (GGM-HR)

$$W(X, Y, Z) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\cos\theta) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos(90^\circ - \theta)$$

2) Modelado regional preciso del campo de gravedad (métodos para la determinación del geode o cuasigeode)

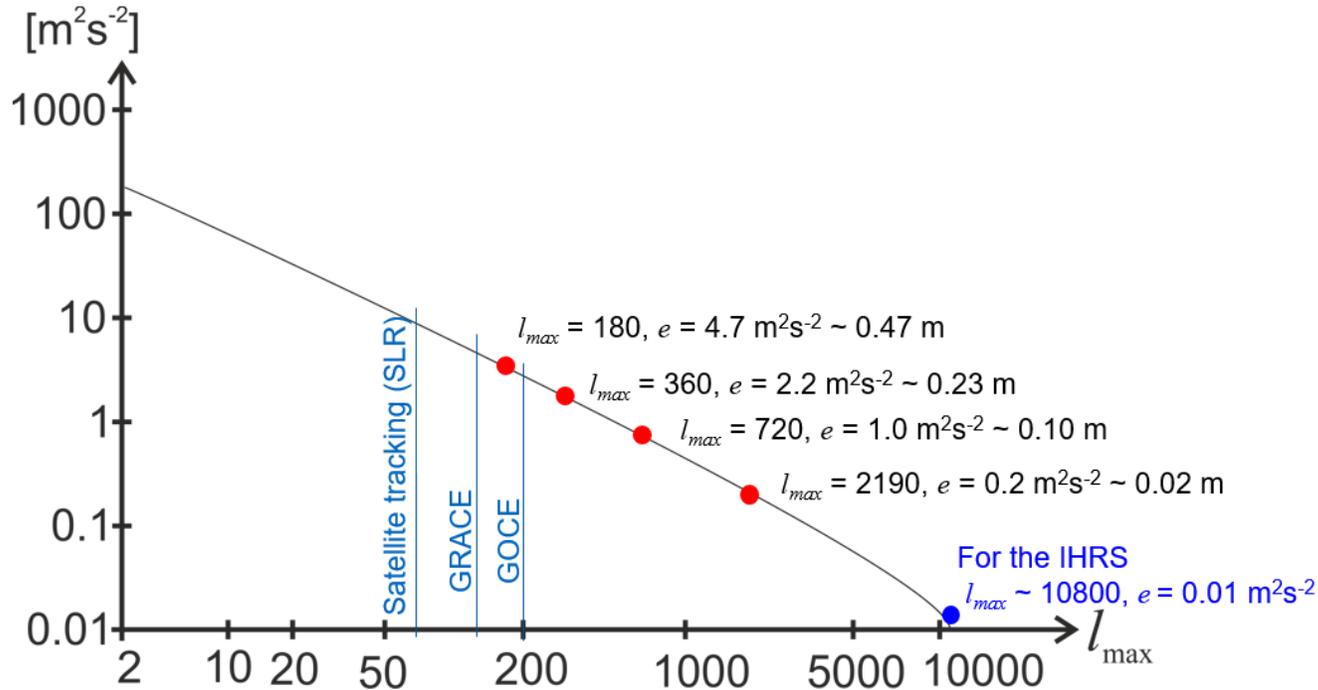
$$W_P = U_P + T_P ; \quad T_P = T_{P, \text{satellite-only}} + T_{P, \text{residual}} + T_{P, \text{terrain}}$$

$$W_P = U_P + \gamma \zeta_P + (W_0 - U_0)$$

3) Conversión de los sistemas de alturas existentes al IHRF, ver detalles en Sánchez L, Sideris MG (2017). *Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRF)* Geophysical Journal International, 209(2), 570-586, <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>.

$$W_P = (W_0^{local} + \delta W) - C_P ; \quad \delta W = W_0^{IHRF} - W_0^{local}$$

Coordenadas IHRF basadas en modelos globales de gravedad



Error de omisión (e) de los GGMs en [m^2s^{-2}] de acuerdo con Tscherning and Rapp (1974), (l_{max} no contiene la totalidad de la señal del campo de gravedad).

Precisión limitada por el error de omisión (Rummel et al., 2014)

- Regiones con gravimetría terrestre de alta densidad:
 $\pm 0.4 m^2s^{-2} \dots \pm 0.6 m^2s^{-2}$
 (equivalente a $\pm 4 cm \dots \pm 6 cm$)
- Regiones con poca gravimetría terrestre de $\pm 2 m^2s^{-2} \dots \pm 4 m^2s^{-2}$ hasta $\pm 10 m^2s^{-2}$
 (equivalente a $\pm 20 cm \dots \pm 40 cm$ hasta $\pm 1 m$)

- Además del error de omisión deben considerarse los errores de observación y de cálculo. La suma de todos ellos debe ser menor que $\pm 0.03 m^2s^{-2}$
- GGM diferentes proveen valores diferentes de potencial en una misma posición \mathbf{X} .

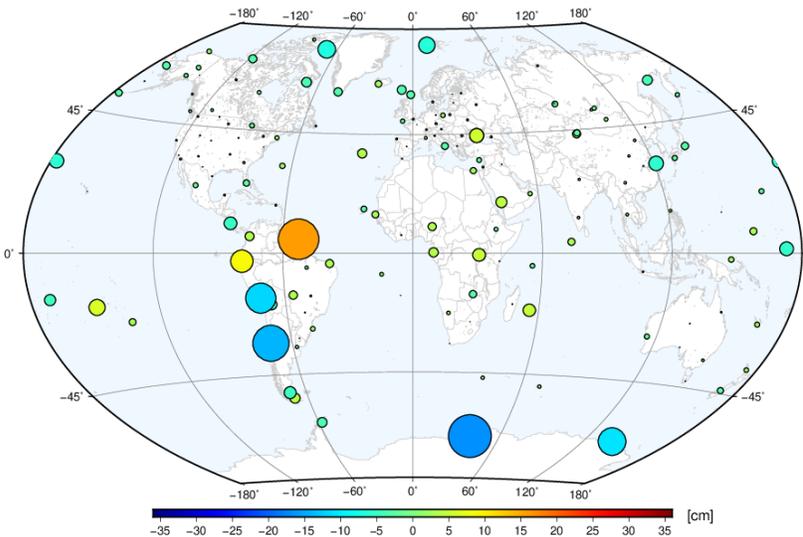
Coordenadas IHRF basadas en modelos globales de gravedad

Comparación de GGMs basados en SLR+GRACE+GOCE ($l = 300$), extendidos a grados altos con EGM2008

- Cálculo de valores de potencial $W(P)$ punto a punto
- Determinación de números geopotenciales $C(P) = W_0 - W(P)$
- Conversión a alturas normales $H^*(P) = C(P)/\gamma$
- Diferencias entre las alturas normales con respecto al valor promedio de los tres modelos.

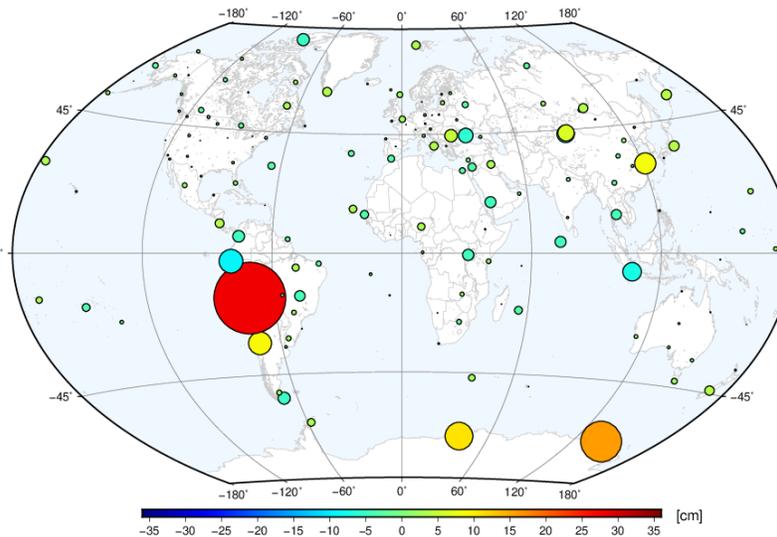
Todos los GGM utilizados en esta presentación se encuentra en <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>

EIGEN-6C4 ($l_{max} = 2190$)



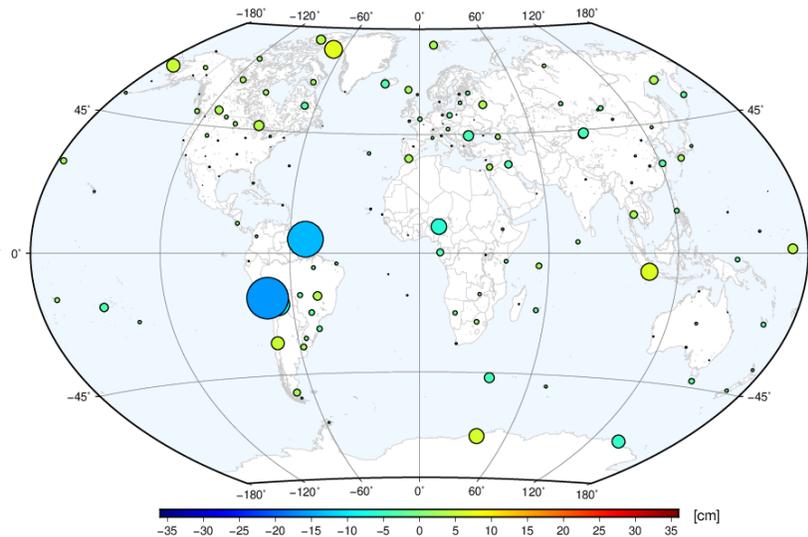
Valor medio: -0.4 cm, STD: ± 3.4 cm,
Min: -16.8 cm, Max: 15.9 cm

GECO ($l_{max} = 2190$)



Valor medio: 0.4 cm, STD: ± 3.8 cm,
Min: -9.3 cm, Max: 28.1 cm

SGG-UGM-1 ($l_{max} = 2159$)

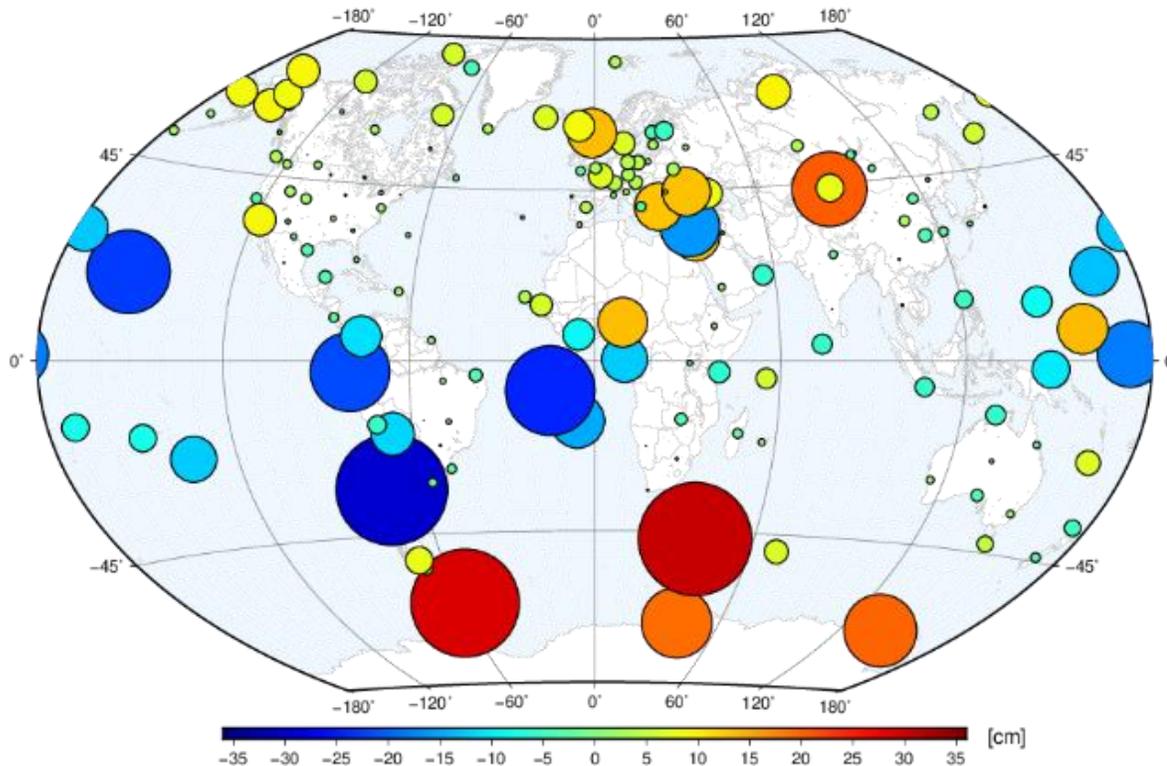


Valor medio: 0.0 cm, STD: ± 2.7 cm,
Min: -16.3 cm, Max: 7.0 cm

Coordenadas IHRF basadas en modelos globales de gravedad

Estudios en desarrollo que pueden mejorar las precisiones actuales:

- Gravimetría terrestre (aérea, marina) nueva, de mejor calidad y mejor distribución (XGM2016, EGM2020)
- Combinación de GGM con datos sintéticos de gravedad generados a partir de modelos topográficos globales (XGM2019e)



Valor medio: 0.5 cm, STD: ± 8.2 cm, Min: -30.5 cm, Max: 31.0 cm

- Comparación de alturas normales calculadas del modelo XGM2019e ($l_{max} = 5,540$) con el valor medio obtenido de EIGEN-6C4 ($l_{max} = 2,190$), GECO ($l_{max} = 2,190$), y SGG-UGM-1 ($l_{max} = 2,159$).
- Estas diferencias son causadas especialmente por la contribución de valores de gravedad posteriores al modelo EGM2008 y por los datos sintéticos de gravedad obtenidos del modelo de topografía Earth2014.
- Para evaluar la confiabilidad de los GGM se requieren datos independientes, usualmente nivelación+gravimetría+GNSS.

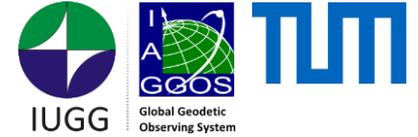
Coordenadas IHRF basadas en el modelado regional (de alta precisión) del campo de gravedad

- GGM basados en SLR, GRACE y GOCE son **muy precisos** ($\pm 1 \dots \pm 2$ cm @ 100 km)
- Error medio de omisión a nivel global: $\approx \pm 45$ cm
- El objetivo es disminuir los **± 45 cm a ± 1 cm** → esto es solo posible mediante la solución del problema del valor de frontera (o contorno) basado en la combinación de GGM + gravedad terrestre + efectos topográficos

$$W_P = U_P + T_P \quad T_P = T_{P,satellite-only} + T_{P,residual} + T_{P,terrain}$$

- La determinación de T_P requiere de una serie de aproximaciones, las cuales influyen los resultados: **diferentes métodos, producen resultados diferentes**
- Un cálculo “**centralizado**” de los valores de potencial es muy complicado porque la gravimetría terrestre es reservada → por tanto, expertos regionales/nacionales deben ser involucrados en el cálculo de las coordenadas IHRF en sus regiones.
- Un procedimiento “**estándar**” de cálculo no es apropiado porque
 - La disponibilidad y calidad de datos gravimétricos son muy diferentes de region a región
 - Zonas de diferentes características demandan diferentes aproximaciones (p.ej. Modificación de las funciones kernel, extensión de los radios de integración, reducciones geofísicas como GIA, etc.).

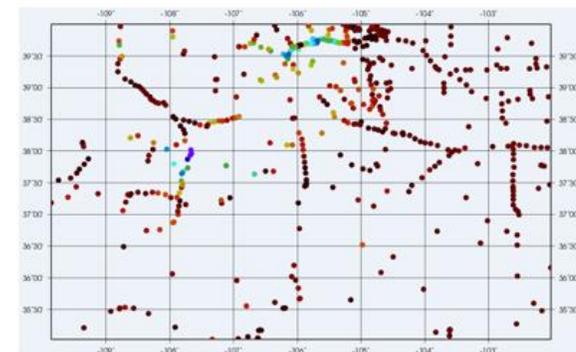
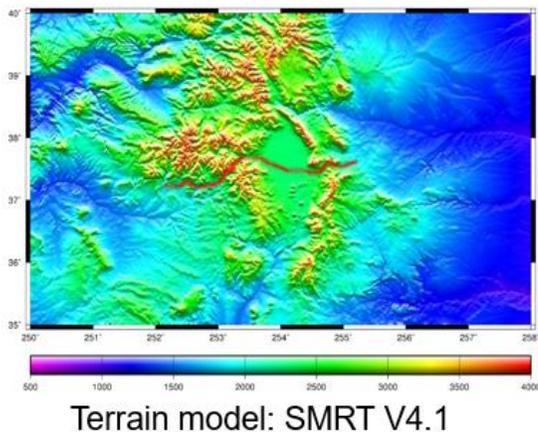
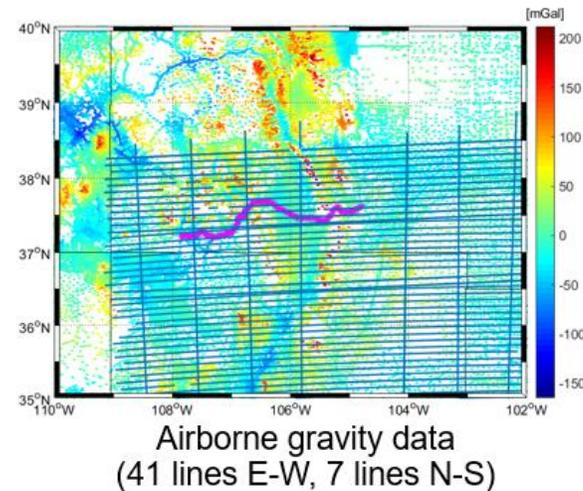
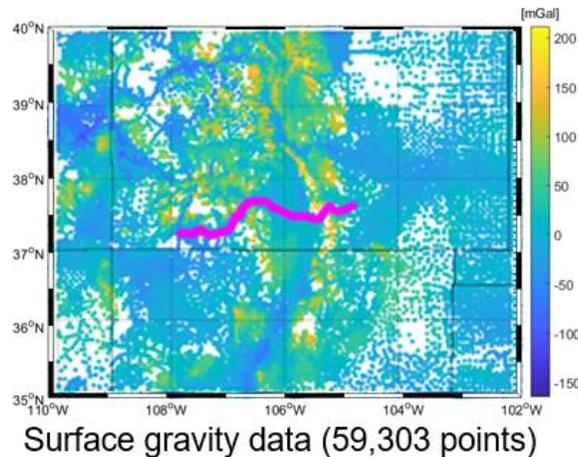
Coordenadas IHRF basadas en el modelado regional (de alta precisión) del campo de gravedad



- Es claro que para el cálculo de las coordenadas de potencial en el IHRF van a utilizarse **diferentes métodos** con **aproximaciones o modificaciones específicas** en zonas específicas,
- Es necesario **“cuantificar”** las discrepancias entre dichos métodos: una cosa son las divergencias causadas por la preparación de los datos, y otra cosa son las divergencias causadas por diferentes modelos matemáticos,
- Se necesita una especie de **“calibración”** de los métodos de cálculo,
- Para el efecto, se llevó a cabo un experimento orientado a la determinación de geoide, cuasigeoide y valores de potencial utilizando exactamente los mismos datos de entrada y los métodos (software) de cálculo de varios colegas involucrados en el modelado preciso del campo de gravedad.
- Mediante la comparación de los resultados se espera:
 - Evaluar la repetibilidad de los valores de potencial utilizando diferentes métodos de cálculo,
 - Identificar un conjunto de estándares que permitan la mayor consistencia posible entre los resultados.

Comparación de métodos de cálculo

Experimento Colorado: cálculo de **geoide**, **cuasigeoide** y **valores de potencial** utilizando los mismos datos de entrada, un conjunto de estándares básicos y diferentes métodos de cálculo.



- Iniciado en julio de 2017
- Datos proporcionados por US NGS
- Estándares preparados por L Sánchez, J Ågren, J Huang, YM Wang, R Forsberg
- Tres diferentes procesamientos (dos iteraciones) finalizados en junio de 2019
- Quince soluciones finales
- Special Issue “Reference Systems in Physical Geodesy” del Journal of Geodesy en preparación con métodos de cálculo, comparación de modelos de geoide y cuasigeoide, plan estratégico para la implementación del IHRF y otras contribuciones sobre el IGRS/IGRF.

Experimento Colorado: contribuciones



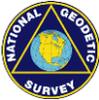
Faculty of Engineering, Minia University, [Egypt](#)



İstanbul Teknik Üniversitesi, Istanbul, [Turkey](#)



Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, [Greece](#)



National Geodetic Survey, [USA](#)



Natural Resources Canada, [Canada](#)



Lantmäteriet, Swedish mapping, cadastral and land registration authority, [Sweden](#)



School of Earth and Planetary Sciences and The Institute for Geoscience Research, Curtin University, [Australia](#)



Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; Centro de Estudos de Geodesia, [Brazil](#)



Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München, [Germany](#)



Ingenieurinstitut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, [Germany](#)



Chinese Academy of Surveying and Mapping, [China](#)



Politecnico de Milano, [Italy](#)



Faculty of Geodesy, University of Zagreb, [Croatia](#) - Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, [Czech Republic](#)



National Space Institute, Technical University of Denmark, [Denmark](#)



Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of Japan, [Japan](#)

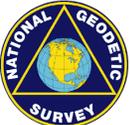
Experimento Colorado: resumen de métodos y modelos

- GGMs: GOCO05s, XGM2016, XGM2018, xGEOID17B, EIGEN-6C4, EGM2008
- Efectos topográficos basados en SRTM V4.1, EARTH2014, COLH19M05, ERTM2160

Cálculo del **cuasigeoide** con integración **FFT** y modificación **Wong-Gore** de la fórmula de Stokes

(1)  Curtin University

(2) 

(3) 

(4) 

A

Cálculo del **cuasigeoide** con una modificación por mínimos cuadrados de la fórmula de Stokes y correcciones adicionales (**LSMSA**)

(5) 

(6) 

(7) 

(8) 

B

Cálculo del **cuasigeoide** con funciones esféricas de base radial (9) y colocación por mínimos cuadrados (10, 11)

(9)  (DGFI)

(10)  (IAPG)

(11)  **POLITECNICO MILANO 1863**

C

Cálculo de geoide con la estrategia **Helmert-Stokes (H-S)** y luego conversión a cuasigeoide

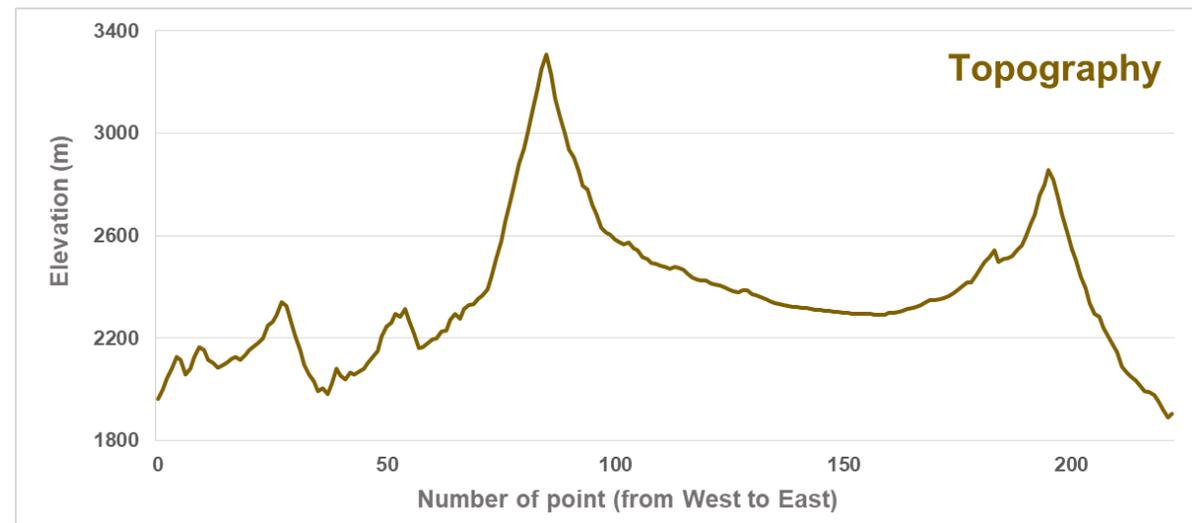
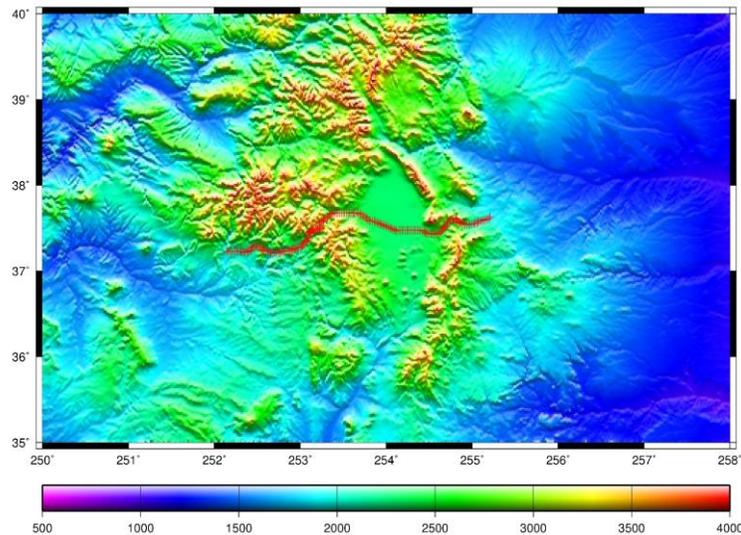
(12) 

(13) 

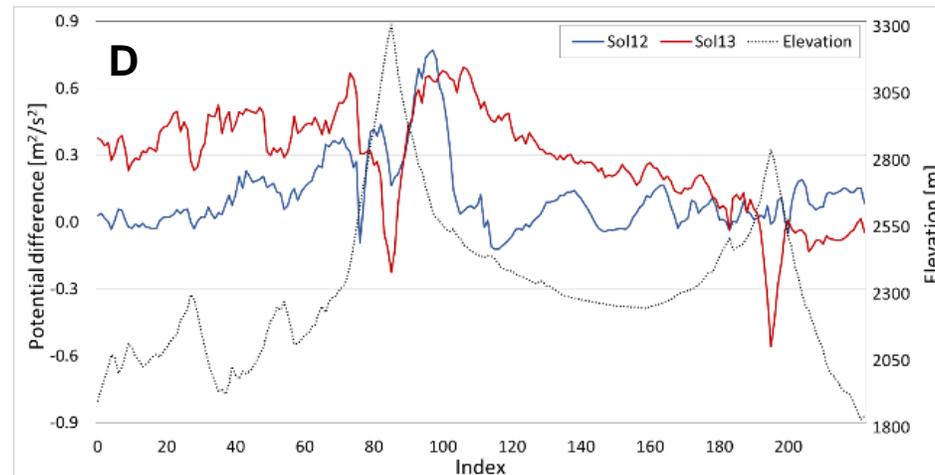
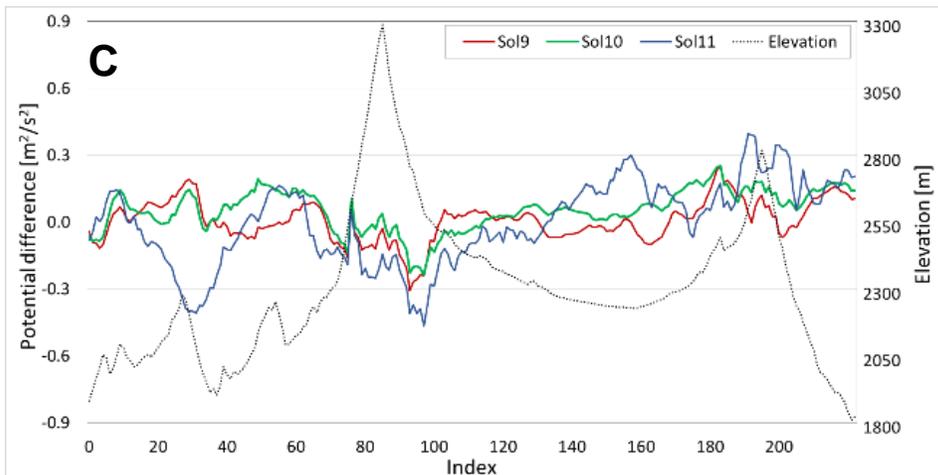
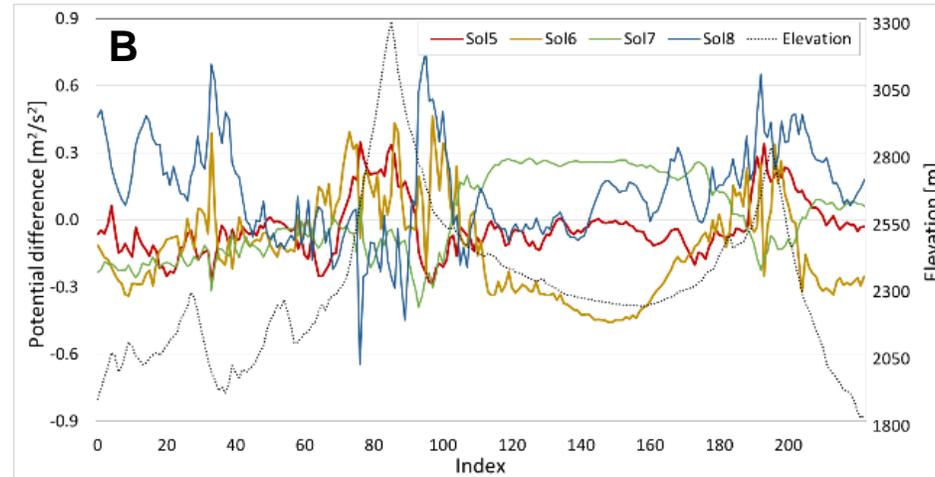
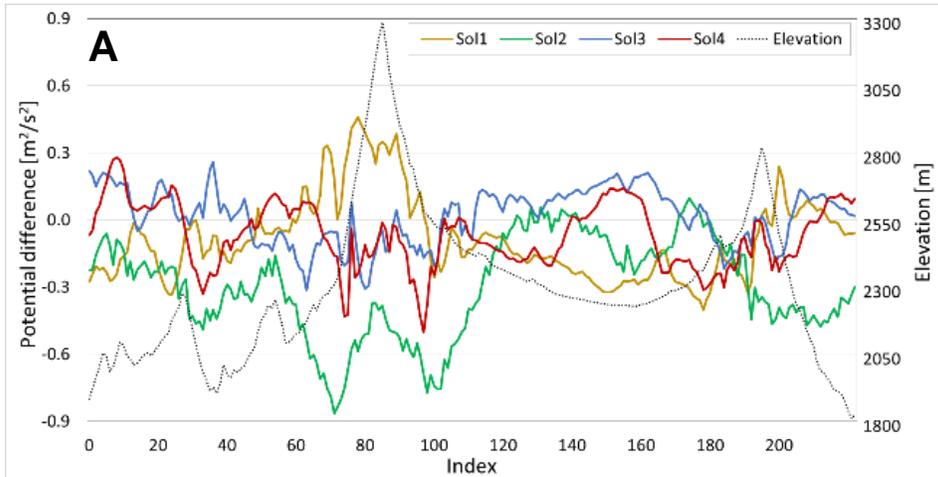
D

Experimento Colorado: comparación de valores de potencial

- 1) Comparación a lo largo del perfil [GSVS17 \(Geoid Slope Validation Survey 2017\)](#): 223 puntos con nivelación, GNSS y gravimetría de alta calidad.
- 2) Participantes en el experimento obtuvieron φ , λ , h ; resultados de la nivelación se utilizan solo para evaluación.
- 3) Los valores de potencial se convierten en números geopotenciales, $C(P) = W_0 - W(P)$.
- 4) y se comparan entre ellos (para evaluar la consistencia entre métodos de cálculo) y con las diferencias de potencial obtenidas de la nivelación + gravimetría (para evaluar la confiabilidad de los resultados).

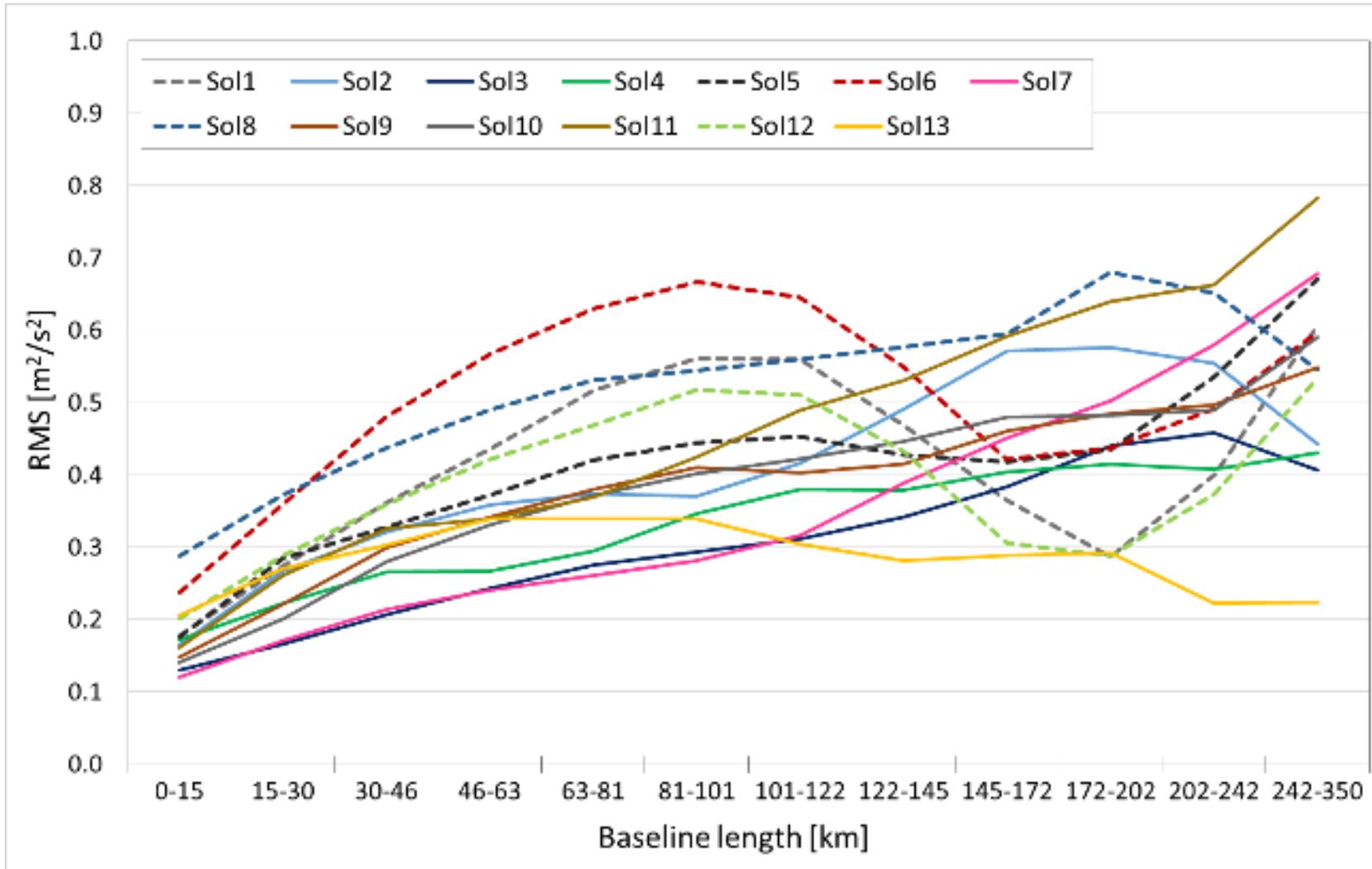


Experimento Colorado: comparación de valores de potencial entre modelos (soluciones)



- Consistencia entre $\pm 0.09 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\pm 0.9 \text{ cm}$) y $\pm 0.23 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\pm 2.3 \text{ cm}$) en términos de desviación estándar con respecto al valor promedio.
- Diferencias punto por punto varían entre $-0.86 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (-8.8 cm) y $+0.77 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($+7.9 \text{ cm}$).
- Las discrepancias describen una correlación alta con la topografía.

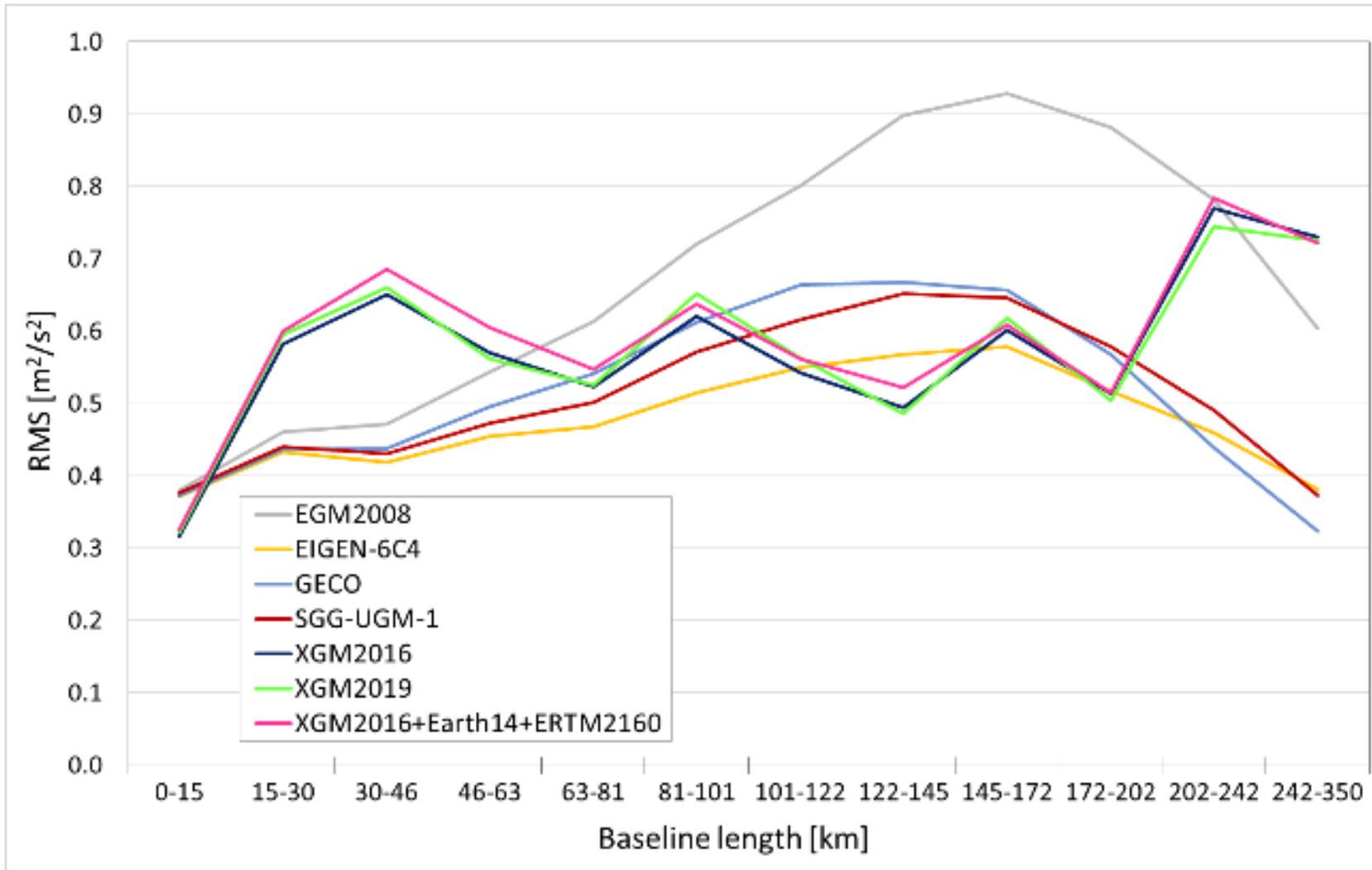
Experimento Colorado: comparación de valores de potencial con nivelación (+ gravimetría)



$$\Delta C_{i,j} = (C_{mod,i} - C_{mod,j}) - (C_{lev,i} - C_{lev,j})$$

Los valores RMS de las diferencias ΔC_{ij} indican la consistencia entre los valores de potencial obtenidos de los modelos y aquellos obtenidos de la nivelación en función de la distancia.

Experimento Colorado: comparación de valores de potencial con nivelación (+ gravimetría)



$$\Delta C_{i,j} = (C_{mod,i} - C_{mod,j}) - (C_{lev,i} - C_{lev,j})$$

Los valores RMS de las diferencias ΔC_{ij} indican la consistencia entre los valores de potencial obtenidos de los modelos y aquellos obtenidos de la nivelación en función de la distancia.

Lecciones del experimento Colorado



- 1) El IHRF no puede ser implementado por una sola persona, o una sola entidad o un solo país. La implementación del IHRF solo es posible bajo una cooperación internacional, fuerte y estructurada como la construida bajo la Asociación Internacional de Geodesia.
- 2) La precisión de los valores de potencial calculados de GGMs depende de los datos gravimétricos terrestres (aéreos) incluidos en dichos GGM y de la topografía de la zona. En áreas de relieve suave y alta densidad de datos gravimétricos pueden obtenerse precisiones mejores que ± 10 cm. En áreas de relieve suave y con pocos datos gravimétricos, la precisión puede desmejorar hasta ± 50 cm. En áreas con fuertes gradientes topográficos y pocos datos gravimétricos la precisión puede ser peor que ± 1 m.
- 3) En áreas con alta densidad de datos gravimétricos y modelos de topografía detallados, los valores de potencial pueden obtenerse de los modelos existentes de geoide o cuasigeoide con precisiones alrededor de ± 3 cm hasta ± 8 cm.
- 4) En áreas con poca densidad de datos de gravedad se sugiere adelantar levantamientos gravimétricos alrededor de las estaciones IHRF (hasta 100 km o 200 km dependiendo de la topografía) y calcular el valor de potencial para esa estación específica. No se recomienda el uso de modelos de geoide o cuasigeoide por su baja precisión.

- 5) Para los casos descritos en (3) y (4) se requieren estrategias de evaluación de los resultados:
- **Cálculo redundante**: dos centros de procesamiento determinan los valores de potencial utilizando los mismos datos de entrada con métodos diferentes
 - **Calibración del método de cálculo**: Determinación de los valores de potencial para una estación IHRF virtual con datos de entrada específicos y comparación de dichos valores con los resultados obtenidos por otros centros de cálculo
 - Establecimiento de **estaciones auxiliares** a distancias de más o menos 100 km, conectadas a las estaciones principales con nivelación (+ gravimetría) para comparar diferencias de potencial entre la nivelación y el modelado del campo de gravedad

Actividades internacionales en desarrollo



- 1) Comparación detallada de las soluciones calculadas para el experimento Colorado a fin de identificar con exactitud las fuentes de divergencia y elaborar un documento con estándares concretos para el cálculo de valores de potencial IHRF.
- 2) Cálculo de la primera solución (estática) del IHRF basada en los recursos existentes y con el apoyo de expertos regionales y locales.
- 3) Desarrollo de estrategias (modelos) que permitan mejorar el modelado de efectos topográficos.
- 4) Desarrollo de estrategias para la determinación de los cambios de potencial a través del tiempo \dot{W} .
- 5) Desarrollo de estrategias para la determinación de índices de precisión confiables.
- 6) Diseño de un 'elemento IHRS/IHRF' dentro del Servicio Internacional del Campo de Gravedad (IGFS: International Gravity Field Service) para asegurar el mantenimiento y disponibilidad del IHRF:
 - Actualizaciones regulares del IHRF_{yyyy} para considerar:
 - Nuevas estaciones;
 - Cambios de las coordenadas en el tiempo $\dot{\mathbf{X}}$, \dot{W} ;
 - Mejoramiento en la determinación de \mathbf{X} y W (más mediciones, mejores estándares, modelos y algoritmos de cálculo, etc.).

Agradecimientos



- GGOS JWG: Strategy for the realisation of the IHRIS (chair: L Sánchez)
- IAG JWG 2.2.2: The 1 cm geoid experiment (chair: YM Wang)
- IAG SC 2.2: Methodology for geoid and physical height systems (chair: J Ågren)
- ICCT JSG 0.15: Regional geoid/quasi-geoid modelling - Theoretical framework for the sub-centimetre accuracy (chair: J Huang)
- IAG JWG 2.1.1: Establishment of a global absolute gravity reference system (chair: H Wziontek)
- IAG regional sub-commissions for reference frames and geoid modelling
- IAG Commission 2 – Gravity Field (chair R Pail)
- International Gravity Field Service – IGFS (chair R Barzaghi)
- GGOS Bureaus of Networks and Observations – GGOS-BNO (chair: M Pearlman) and Products and Standards – GGOS-BPS (chair: D Angermann)