# Del Experimento del Colorado al cálculo de coordenadas IHRS en la Región SIRGAS

Agustín Reynaldo Gómez[1,2], Claudia Noemí Tocho[1,4],
Diego Alejandro Piñón[3], Ezequiel D. Antokoletz[1,2].

[1]Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata, Argentina
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina
[3]Instituto Geográfico Nacional (IGN), Argentina
[4]Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-BA), Argentina

# 1. Introducción

# 1. Introducción

**¿Cómo se define el IHRS? (Resolución nº1 IAG, 2015)**

1. La superficie de referencia es una **equipotencial** del campo de gravedad terrestre de valor geopotencial $W_0 = 62636853.4\ m^2s^{-2}$
2. Coordenada IHRS de punto P sobre la superficie es el **número geopotencial de P:**

$$C(P) = W_0 - W(P)$$

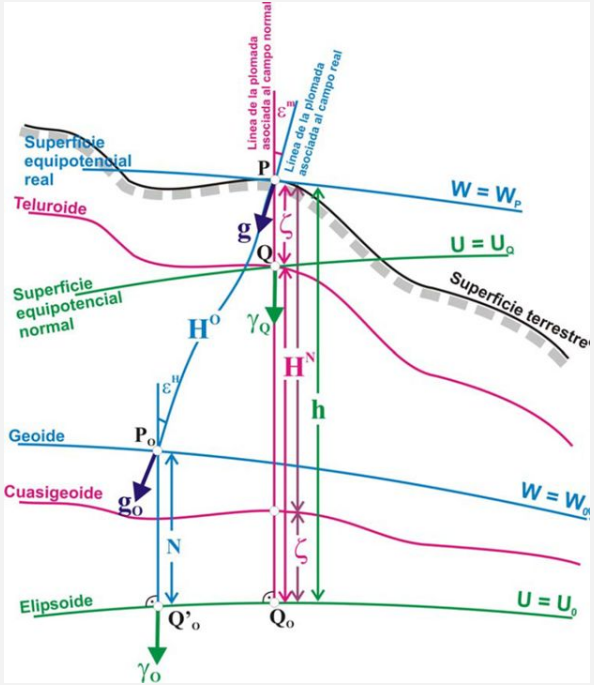
3. La posición de P estará determinada en el ITRS **($X_{ITRS}$)**.
4. Deben determinarse variaciones temporales de **$X_{ITRS}$(P) y C(P)**.
5. Las coordenadas están dadas en el sistema **mean-tide / mean-crust**.
6. Las unidades utilizadas son el metro y el segundo (SI).

# 1. Introducción

**Números geopotenciales son las coordenadas IHRS:**

$$C(P) = W_0^{IHRS} - \boxed{W(P)}$$

**El principal problema es determinar W(P).** Para esto, se puede realizar un modelado regional de (cuasi)geoide gravimétrico.




*Fuente: Modificado de Sanchez et. al., 2021.*

Gravedad
Modelos Geopotenciales Globales
Modelos Digitales de Elevación

Modelado de (cuasi)geoide

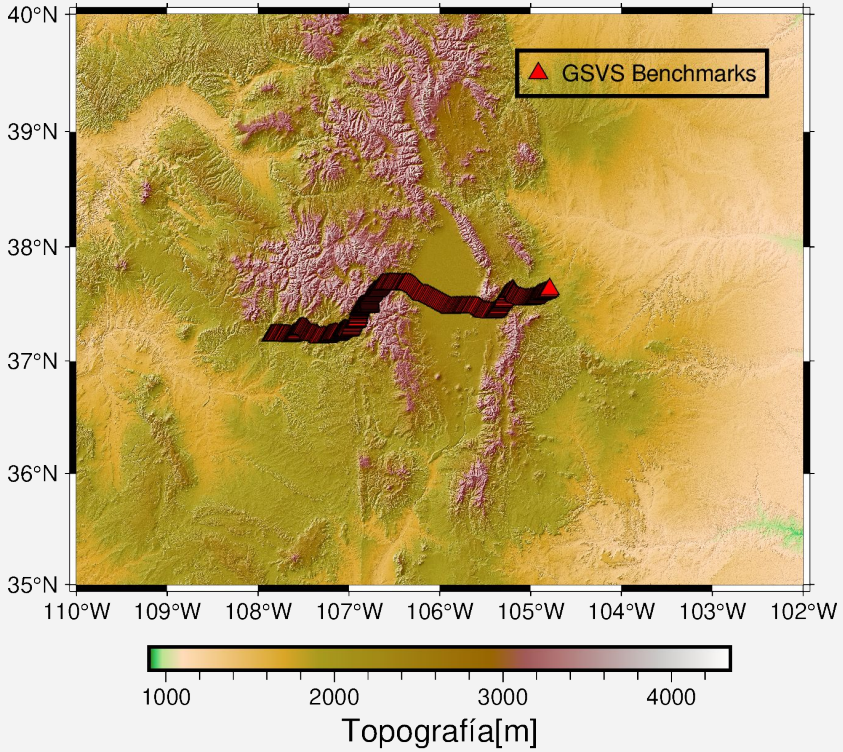
$$T(P) = W(P) - U(P)$$

# 1. Introducción

**Experimento del Colorado (Wang et. al., 2021)**

Se convocaron **14 grupos de investigación** de todo el mundo con el objetivo de obtener los C(P) en los puntos asociados a una línea de *benchmarks* (campaña **GSVS17**).

Para el modelado, se indicó a los participantes que: (a) no había restricciones en los algoritmos/métodos de cálculo utilizados, (b) debían utilizar un set de datos específico.



# 1. Introducción

**Objetivo de este trabajo**: replicar resultados del experimento del Colorado obtenidos por AUTh (Aristotle University of Thessaloniki, Greece) (Grigodiaris et. al., 2021). Dos etapas de trabajo

1. Modelado de CG en la región de estudio
2. Validación de resultados con modelo de CG de AUTh y de GGM XGM2016.

**¿Por qué es importante?**

- ➔ Hay grandes esfuerzos internacionales para materializar el IHRS;
- ➔ Esto implica contar con modelos de geoide precisos con un estándar del orden del cm;
- ➔ En la región SIRGAS, no se sabe si las técnicas de modelado garantizan un error cm;
- ➔ En Argentina en particular, se busca un nuevo modelo de geoide con el fin de colaborar con el establecimiento del IHRF;
- ➔ **Por lo tanto, el experimento permite revisar metodologías que podrían utilizarse en la región.**

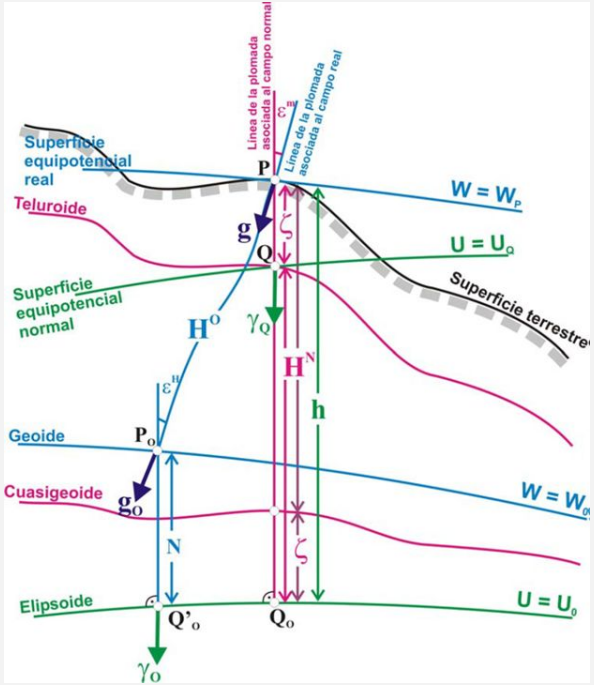
# 2. Metodología

# 2. Metodología

Se trabajó usando la **teoría de Molodensky**. Los datos de gravedad se convierten a

$$\Delta g = g_P - \gamma_{Q_0}\left(1 - 2\left(1 + f + m - 2f\,\sin^2\phi\right)\frac{H^*}{a} + 3\left(\frac{H^*}{a}\right)^2\right)$$

a: Semieje mayor del elipsoide de referencia (GRS80).
f: Aplanamiento (GRS80).
m: constante (GRS80).
H*: altura normal (elipsoide al teluroide).




*Fuente: Modificado de Sanchez et. al., 2021.*

# 2. Metodología

Se utilizó la técnica **remover-calcular-restaurar (RCR)** para resolver el problema de valores de contorno (GBVP) de Molodensky y obtener anomalías de altura.

**Remover**

$$\Delta g_r = \Delta g - \Delta g_{GGM} - \Delta g_{RTM}$$

$\Delta g_{GGM}$: Obtenida de **Modelos Geopotenciales Globales**. Remueven las largas longitudes de onda.

- Modelos satelitales: GOCO
- Modelos híbridos: XGM2016, XGM2019e_2159.

$\Delta g_{RTM}$: Se modela la topografía local mediante una **superficie de referencia**. Remueve las cortas longitudes de onda.

- cRTM: Dominio espacial.
- sRTM: Dominio de Fourier.

# 2. Metodología

**Calcular**

$$\Delta g_r \Rightarrow \zeta_r = \text{Molodensky}(\Delta g_r)$$

**Resolución del GBVP**

- ➔ Colocación por mínimos cuadrados (LSC): Permite la estimación de cualquier funcional de T(P) mediante observaciones y una estimación de la función de covarianza. (poner autores q usaron LSC)
- ➔ **Métodos FFT**: Resuelven en el dominio de Fourier. Requiere grillado de las observaciones. (IDEM arriba)

# 2. Metodología

**Restaurar**

$$\zeta = \zeta_r + \zeta_{GGM} + \zeta_{RTM} + \zeta_0 \xrightarrow{\text{Bruns}} T(P) = \gamma\zeta(P)$$

$\zeta_{GGM}$: Se utiliza el mismo GGM con la misma resolución.
$\zeta_{RTM}$: Se utiliza la misma grilla de referencia.

**Término de orden cero**

$\zeta_0$: Contiene la diferencia entre el elipsoide de referencia del GGM y GRS80. Debe sumarse como corrección al modelo de cuasigeoide:

$$\zeta_0 = \frac{GM_{GGM} - GM_{GRS80}}{r_P \gamma_Q} - \frac{\Delta W_0}{\gamma_Q}$$

Donde $\Delta W_0 = W_0 - U_0 = -7.45\ m^2 s^{-2}$, siendo:
$W_0$: Potencial de referencia convencional del IHRF
$U_0$: Potencial de referencia GRS80

# 3. Preproceso y manejo de datos

# 3. Preproceso y manejo de datos

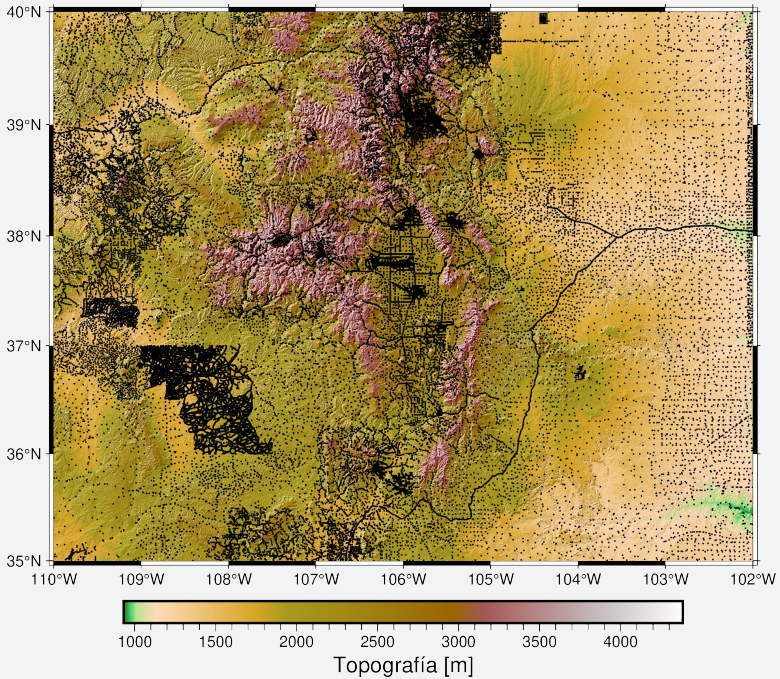
**Datos utilizados**

1. Se cuenta con datos terrestres y aerogravimétricos. Solo se trabajó con los datos de **gravimetría terrestre**.
2. Modelo Digital de Elevación STRM v4.1 (Res 3")
3. Modelo Geopotencial Global XGM2016 (d/o 719)

**Sobre los datos y su tratamiento**

- Los datos para el experimento fueron provistos en el concepto de marea **tide-free**.
- Los software de modelado son provistos por el paquete GRAVSOFT otorgado en la escuela de Geoide de 2021 del ISG.

# 3. Preproceso y manejo de datos




**Etapas de preproceso de datos terrestres** (AUTh, Grigodiaris et. al., 2021):

1. Remover datos idénticos
2. Mismas coordenadas, distinta g (menos de 0.015 mGal de diferencia)
3. Misma (φ,λ), distinta H (más de 12 m), distinta g (más de 0.015 mGal)
4. Misma (φ,λ), distinta H (menos de 12 m), distinta g (menos de 1 mGal)
5. Restantes con misma (φ,λ).
6. Se aplicó un criterio de 3σ para remover puntos restantes.

Se removieron **2193 de 59303 (3.7%) puntos** del set de datos.

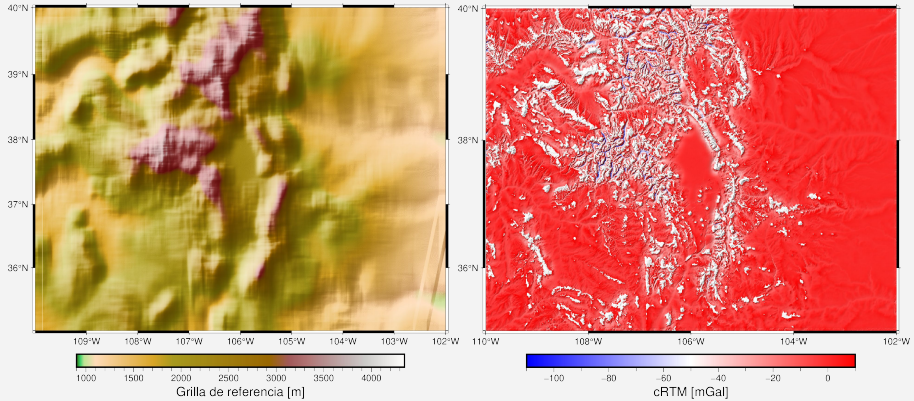
# 4. Modelado de cuasigeoide

# 4. Modelado de cuasigeoide

**Calculando la gravedad residual (Remover)**

GGM Utilizado: **XGM2016** hasta grado y orden 719

RTM: **cRTM** con grilla de referencia de resolución 16.0'.




**Anomalía de aire libre residual [mGal]**

| Min | Max | Media | Std. dev |
|---|---|---|---|
| -148.48 | 60.45 | -0.01 | 10.96 |

# 4. Modelado de cuasigeoide

**De anomalías de gravedad residuales a anomalías de altura residuales (Calcular)**

Resolución: **1D spherical FFT (Haagmans et. al., 1993) → Requiere grillado de las anomalías**

**Grillado de datos**

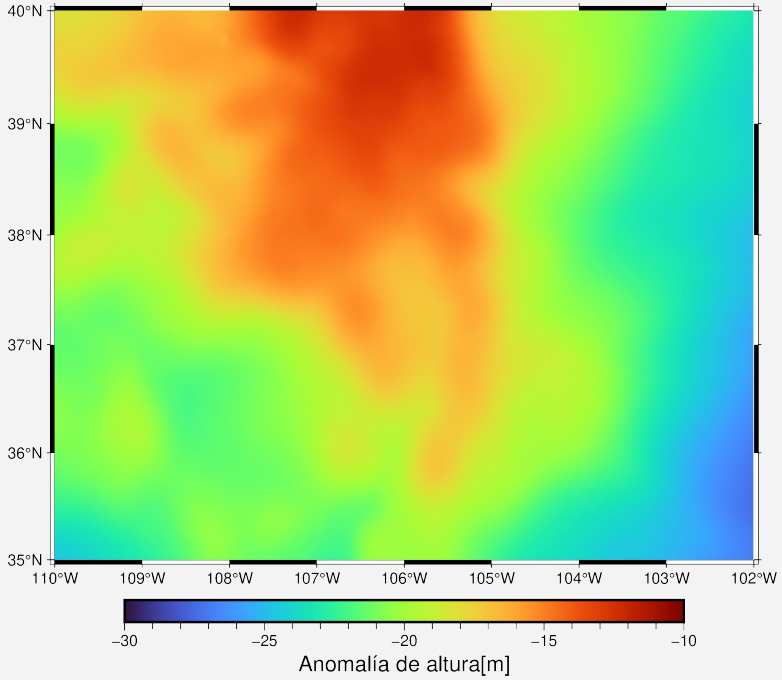
- ➔ Se grillaron las anomalías de aire libre
- ➔ Resolución: 1'x1'
- ➔ Grillado: colocación por mínimos cuadrados
- ➔ Software utilizado: GEOGRID (Paquete GRAVSOFT)

**Método 1D FFT**

- ➔ Calcula la TF a lo largo de cada paralelo (una dimensión).
- ➔ Se aplicó una modificación de Wong-Gore en el grado **450** (Grigodiaris et. al., 2021).
- ➔ Software utilizado: SP1D (Paquete GRAVSOFT)

# 5. Resultados preliminares y validación

## Recuperando las cortas y largas longitudes de onda (Restaurar)




$$\zeta = \zeta_r + \zeta_{GGM} + \zeta_{RTM}$$

**Anomalía de altura [m]**

| Min | Max | Media | Std. dev |
|---|---|---|---|
| -27.347 | -12.099 | -19.474 | 3.284 |

# 5. Resultados preliminares y validación

# 5. Resultados preliminares y validación

**Validación de (cuasi)geoide gravimétrico**

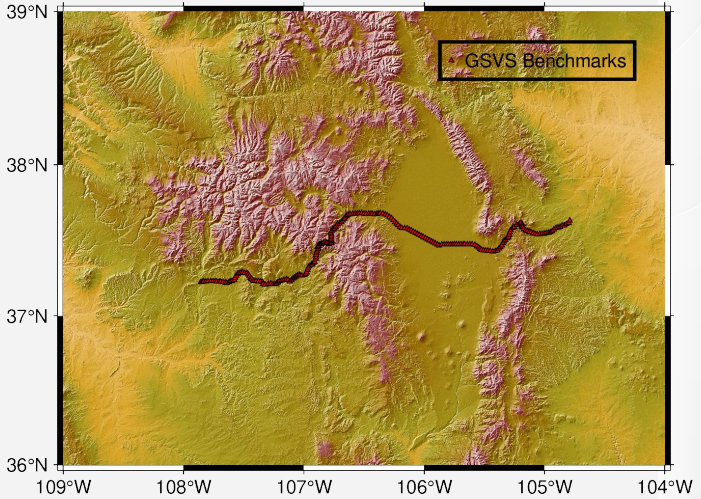
1. Calcular ondulaciones geoidales en línea GSVS17:

$$N_{obs} = h_{obs} - H_{obs}$$

2. Convertir el modelo de $\zeta$ a N usando el término de separación:

$$N_{\mathrm{mod}} \approx \zeta_{\mathrm{mod}} + \frac{\Delta g_{AB}}{\bar{\gamma}} H$$

3. Calcular $N_{mod}$ en los puntos GSVS.
4. **Análisis absoluto y relativo.**



# 5. Resultados y validación

Comparación absoluta ($N_{mod}$ - $N_{obs}$) [cm]

| Modelo | Min. | Max. | **Media** | **Std. dev.** |
|---|---|---|---|---|
| Propio | 65.4 | 92.2 | **81.5** | **5.84** |
| AUTh | 78.3 | 91.7 | **86.4** | **2.77** |
| XGM2016 | 47.2 | 104.0 | **75.5** | **11.4** |

# 5. Resultados y comparación

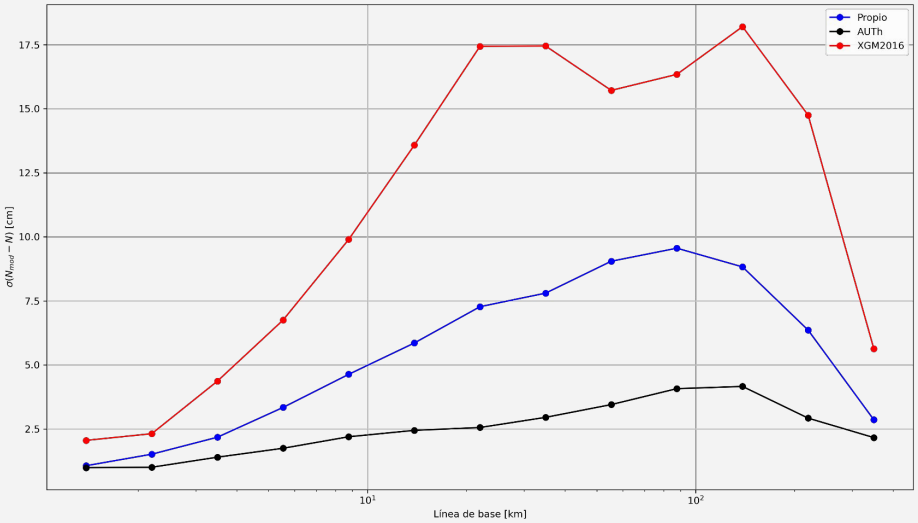
**Análisis relativo de los modelos**

1. Para una dada línea de base $d_{ij}$ se calcula la diferencia relativa entre cada par de puntos:

$$\Delta N_{ij} = (N_{\mathrm{mod},i} - N_{\mathrm{obs},i}) - (N_{\mathrm{mod},j} - N_{\mathrm{obs},j})$$

2. Calcular la desviación estándar para cada set de puntos.

Indica la consistencia entre el modelo y la observación en función de la distancia.



# 6. Conclusiones y trabajo a futuro

# 6. Conclusiones y trabajo a futuro

**Conclusiones**

- Los resultados **no son consistentes** con los obtenidos por AUTh.
  - Valor medio y desviación estándar absoluta deben reducirse aún más.
  - La curva de la validación relativa debe disminuir.
  - Análisis con GGM demuestra que existen problemas con el modelado de la topografía.
- El modelo de cuasigeoide es **preliminar** y debe ser evaluado en múltiples aspectos.
- Por ende, no se justifica calcular con este modelo los números geopotenciales.

# 6. Conclusiones y trabajo a futuro

**Trabajo a futuro**

- En el preprocesamiento
  a. Incorporar otras técnicas de detección de *outliers*
  b. Utilizar los datos aerogravimétricos
  c. Corregir por efecto atmosférico
  **d. Grillado de anomalías de Bouguer**
- En el modelado
  a. Utilizar GGM satelital
  **b. Utilizar sRTM**
  c. Revisar parámetros de integración y de WG en 1DFFT esférica

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

CONICET

# ¡Gracias!

**Contacto:**
**agusgomez@fcaglp.unlp.edu.ar**

IGN Instituto Geográfico Nacional REPÚBLICA ARGENTINA

SIRGAS 2022 SANTIAGO DE CHILE