

Estado actual de los marcos de referencia vertical

- Desvinculación de los sistemas de alturas
(~ 100 sistemas distintos en el mundo)
- Desde diferentes mareógrafos (discrepancias $1 \sim 2m$)
- Con diferentes reducciones a los datos de nivelación
- En diferentes épocas

Estado actual del sistema de altura chileno (SACH)

Dadas las características geográficas (extensión y forma) del territorio chileno, el sistema de alturas fue realizado:

- Propagación desde diferentes mareógrafos
- Definidos en distintas épocas
- No todos están interconectados
- Ambigüedad de las correcciones aplicadas a las alturas
- Omisión de movimientos verticales



Como consecuencia, existen varios sistemas de altura independientes!!!

Posibilidades actuales de unificación, y limitaciones en el SACH

Existe a lo menos 5 posibilidades de abordaje para contornar el problema de conexión (Heck and Rummel 1990):

① Nivelación + Gravimetría (en el continente):

$$C_P = W_0 - W_P = \int_{P_0}^P g dn \approx \sum_k g_k \cdot \delta n_k$$

Grandes extensiones por nivelar + gravimetría

② Abordaje Oceanográfico:

- Nivelación estérica:
$$W_{AB} = \int_B^{B'} \frac{1}{\rho} dp - \int_A^{A'} \frac{1}{\rho} dp$$

Falta de datos regionales (salinidad, presión, velocidad del océano, otros)

- Nivelación dinámica:
$$W_{AB} = \int_B^{B'} f v_t dt$$

③ Gravimetría + GPS:

$$W_{AB} = f(\Omega, \Delta W_{P_i A}, \Delta W_{Q_i B}, MGG, g); \quad \Omega = (X, Y, Z)$$

Falta de densidad de datos

④ Altimetría por satélite (AS):

(AS + MGG) + Nivelación Dinámica

Falta de modelos regionales de SSTop

⑤ Problema de Valor de Contorno de la Geodesia (PVCG):

$$\Delta g = -\frac{2\gamma}{r} \cdot \zeta - \frac{\partial T}{\partial r} \quad ; \quad \Delta C = \gamma \cdot \zeta - T + \Delta W$$

$$W_{AB} = f(\Omega, \Delta g, \Delta C)$$

Falta de densidad de datos

Problemática

La adopción del nivel medio del mar local (NMML) en múltiples mareógrafos, como nivel de referencia cero para el sistema de altura chileno, ha resultado un *offset* espacialmente variable entre el geoide y el sistema de altura chileno (SACH).

Problemática

La adopción del nivel medio del mar local (NMML) en múltiples mareógrafos, como nivel de referencia cero para el sistema de altura chileno, ha resultado un *offset* espacialmente variable entre el geoide y el sistema de altura chileno (SACH).

No obstante, según:

- Filmer and Featherstone (2012), estos *offset* son causados principalmente por la SStop o TNMM.
- Según Fenoglio-Marc (1996), la diferencia de altura entre los ceros de los datos verticales puede idealmente corresponder a la topografía del nivel medio del mar (permanente) independiente del tiempo, pero la realidad es más complicada, debido a la variación temporal absoluta de la altura del nivel medio del mar y el alzamiento vertical de la tierra *land Uplift*.

Enfoque oceanográfico

Modelo de Topografía del Nivel Medio del Mar SSTop

$$\text{SSTop}_i = \text{SSH}_i - N_i$$

donde:

SSTop_i : Topografía del Nivel Medio del Mar

SSH_i : Altura de la superficie del Mar

N_i : Altura geoidal

Según Fenoglio-Marc (1996), la diferencia de altura entre los ceros de los *data* verticales puede idealmente corresponder a la Topografía del Nivel Medio del Mar o SSTop (permanente)...

$$\delta_{ij}^O = \text{SSTop}_i - \text{SSTop}_j$$

donde:

δ_{ij}^O : *offset* entre los Mareógrafos *i* y *j*

SSTop_i : Mareógrafo *i*

SSTop_j : Mareógrafo *j*

Los valores de SSTop fueron interpolados/extrapolados hasta los mareógrafos por Kriging.

Enfoque geodésico

Modelo de Geopotencial Global MGG

Segun Burša et al. (2001), la diferencia de geopotencial entre *data* verticales es dada por:

$$h = H + N \iff H = h - N$$

Segun Hofmann-Wellenhof and Moritz (2006):

$$\begin{aligned}
 H^{GPS/MGG} &= h - N \\
 \delta^{MGG} + e &= H^{Niv} - H^{GPS/MGG} \\
 \delta_A^{MGG} &\approx \sum_{i=1}^n \frac{H_i^{Niv} - H_i^{GPS/MGG}}{n} \quad ; \quad \delta_B^{MGG} \approx \sum_{i=1}^n \frac{H_i^{Niv} - H_i^{GPS/MGG}}{n} \\
 \delta_{AB}^{MGG} &= \delta_A^{MGG} - \delta_B^{MGG}
 \end{aligned}$$

donde:

δ_{AB}^{MGG} : *offset* entre los *data* A y B

δ_A^{MGG} : Diferencia del datum A respecto al MGG

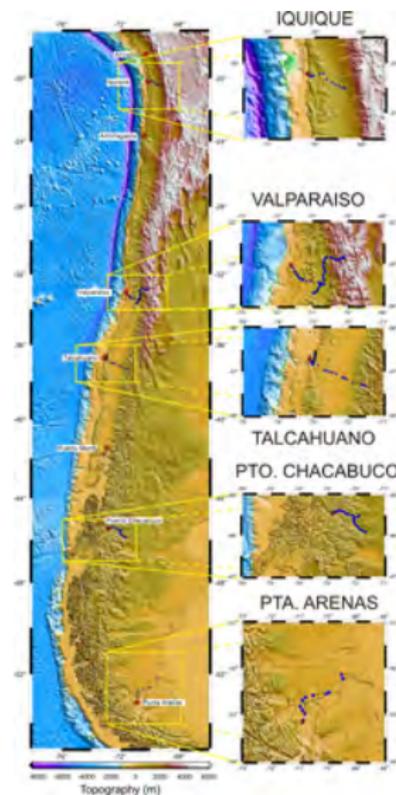
δ_B^{MGG} : Diferencia del datum B respecto al MGG

Datos

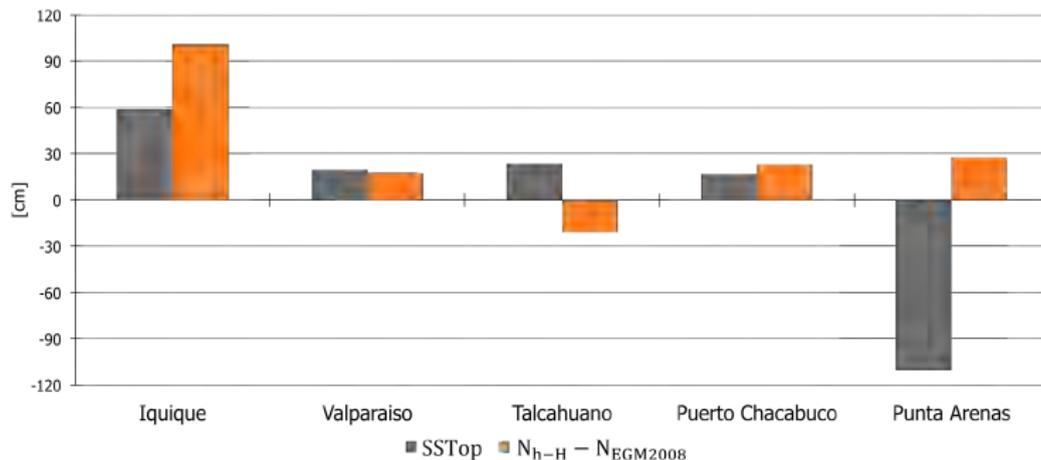
El estudio fue desarrollado a lo largo de todo Chile, comprendiendo específicamente 5 zonas.

Los datos utilizados fueron:

- 189 Puntos de Referencias (PR), con sus coordenadas geodésicas en WGS84 y altura respecto al nivel medio del mar local (NMML):
Líneas: 4A, 5A, 6A, 11A, 19E, 12E, 9E, 24E, 10G, 8G, 6I, 7I, 6L, 5L.
- El EGM2008 (Pavlis et al. 2008).
- El modelo Topografía del Nivel Medio del Mar DNSC08 MDT (Andersen and Knudsen 2009).



Offset determinados para cada región



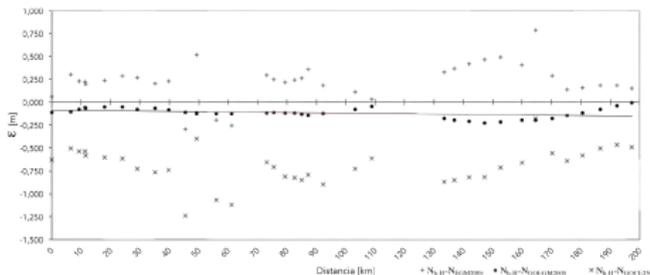
- Los Mareógrafos de Iquique, Valparaíso y Puerto Chacabuco tienen la misma tendencia en los dos abordajes;
- Los Mareógrafos de Valparaíso y Puerto Chacabuco presentan alta consistencia por ambos abordajes ($\sim 6cm$);
- Los Mareógrafos de Talcahuano y Punta Arenas presentan tendencias opuestas en ambos abordajes.

Evidencia de inclinaciones del SACH respecto del MGG

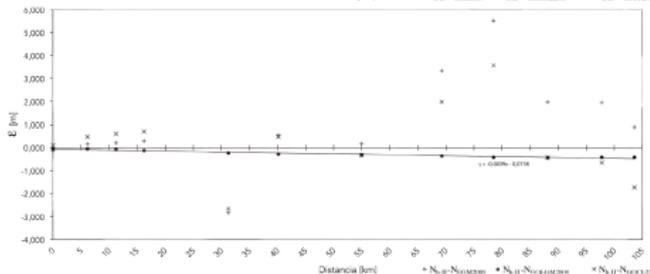
- MGG utilizados
- EGM2008: $N_{d,o=max}^{EGM2008}$, d/o 2190 y 2159, modelo combinado
 - GOCE: $N_{d,o=max}^{GOCE}$, d/o 250, solo satélite
 - GOEGM2008: $N_{GOEGM2008} = N_{d,o=200}^{GOCE} + N_{d,o>200}^{EGM2008}$

Después de removido el *offset* medio (δ^{MGG}), fueron obtenidas las siguientes inclinaciones:

- Mínima inclinación, orientación Oeste-Este: línea Chacabuco-Huemules, $0,3mm/km$



- Máxima inclinación, orientación Oeste-Este: línea Iquique-Estación Lagunas, $4mm/km$



Consideraciones finales

Aunque en este estudio no fue realizada una unificación oficial del sistema de altura chileno, fueron presentados valores de *offset* preliminares del sistema vertical chileno. Además fue presentada y evaluada una metodología con los datos actualmente disponibles.

- Los *offset* de la RVCH fueron determinados en relación a una superficie de referencia global (MGG), explorados por un abordaje Geodésico y otro Oceanográfico.
- Los valores de *offset* obtenidos por ambos abordajes son consistentes sólo en dos regiones:
 - Valparaiso
 - Puerto Chacabuco
- En otros casos se obtuvieron *offset* en sentido opuesto y magnitud diferentes (e.g. Punta Arenas)
- Las inclinaciones del sistema vertical chileno respecto del MGG, el modelo híbrido GOEGM2008 presentó la mas clara tendencia, principalmente en las líneas de nivelación:
 - Línea Oeste - Este: Chacabuco - Huemules con $0,3\text{mm}/\text{km}$
 - Línea Oeste - Este: Iquique - Estación Lagunas con $4\text{mm}/\text{km}$

Limitaciones del estudio

- Disponibilidad de datos mas actuales y con una mayor cobertura (gravedad, alturas);
- Especificación de la calidad de los datos (MVC; precisión de h, H y N);
- Interconexión de líneas entre mareógrafos;
- Desconocimiento de la realización del sistema de altura chileno;
- Limitación en la alta frecuencia del modelo del EGM2008;
- Consideración de los efectos de mareas en la determinación NMML (pole tide, lunar perigee tide y lunar node tide);
- Dificultades en el modelaje de la SSTop en zonas costeras (donde están los mareógrafos)

Desafíos futuros

- Resolver inconsistencias del SACH necesarias para calcular un geoide regional
- Estudio del sistema de altura chileno y su proximidad con un tipo de altura de origen físico. (e.g. ortométrica o normal);
- Consideración de las variaciones temporales del geopotencial;
- Determinar los *offset* por intermedio de otros abordajes (Gravimetría + GPS);
- Modelaje regional de la SSTop.

Referencias I

- Andersen, O. and Knudsen, P. (2009). Dnsc08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *Journal of Geophysical Research*, 114(C11):C11001.
- Burša, M., Kouba, J., Müller, A., Raděj, K., True, S. A., Vatrt, V., and Vojtíšková, M. (2001). Determination of Geopotential Differences between Local Vertical Datums and Realization of a World Height System. *Studia Geophysica Et Geodaetica*, 45:127–132.
- Fenoglio-Marc, L. (1996). *Sea Surface Determination with Respect to European Vertical Datums*. PhD thesis, Department of Surveying Engineering of Technische Universität Darmstadt.
- Filmer, M. S. and Featherstone, W. E. (2012). A re-evaluation of the offset in the australian height datum between mainland australia and tasmania. *Marine Geodesy*, 35(1):107–119.
- Heck, B. and Rummel, R. (1990). Strategies for solving the vertical datum problem using terrestrial and satellite geodetic data. In *Sea Surface Topography and the Geoid*, volume 104 of *International Association of Geodesy Symposia*, pages 116–128.
- Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K. (2008). An earth gravitational model to degree 2160: Egm2008, presented at the 2008 general assembly of the european geoscience union. Vienna, Austria.

Gracias por su atención
Thanks for your attention
Abrigado pela atenção