

# Vertical Datum Standardization in South America

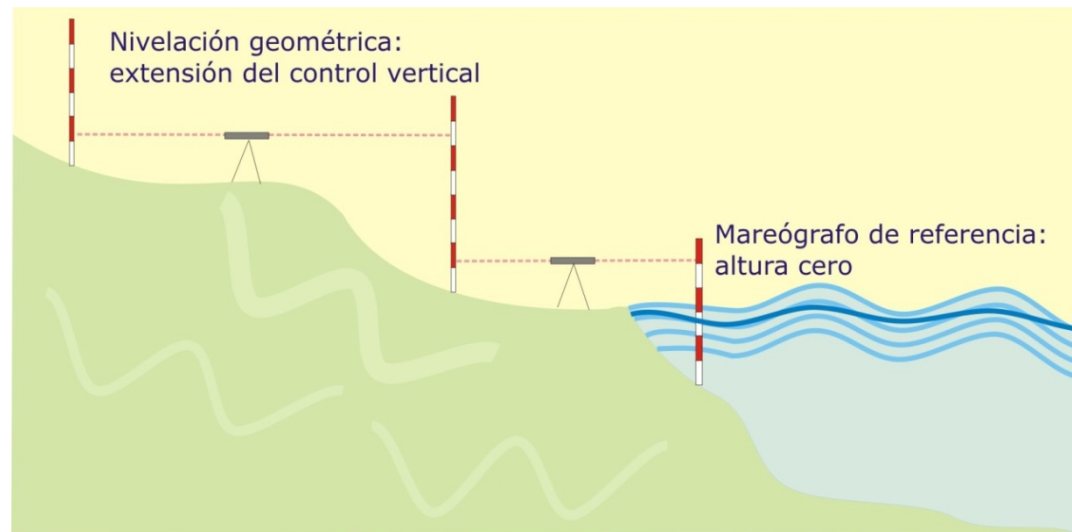
**Laura Sánchez**

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)  
Munich, Alemania



# Sistemas de alturas existentes en América del Sur

	Definición	Materialización
Superficie de referencia	geoide	nivel medio del mar en mareógrafos
Coordenada vertical	alturas ortométricas	nivelación geodésica con correcciones de gravedad (por definición pero no en la práctica)

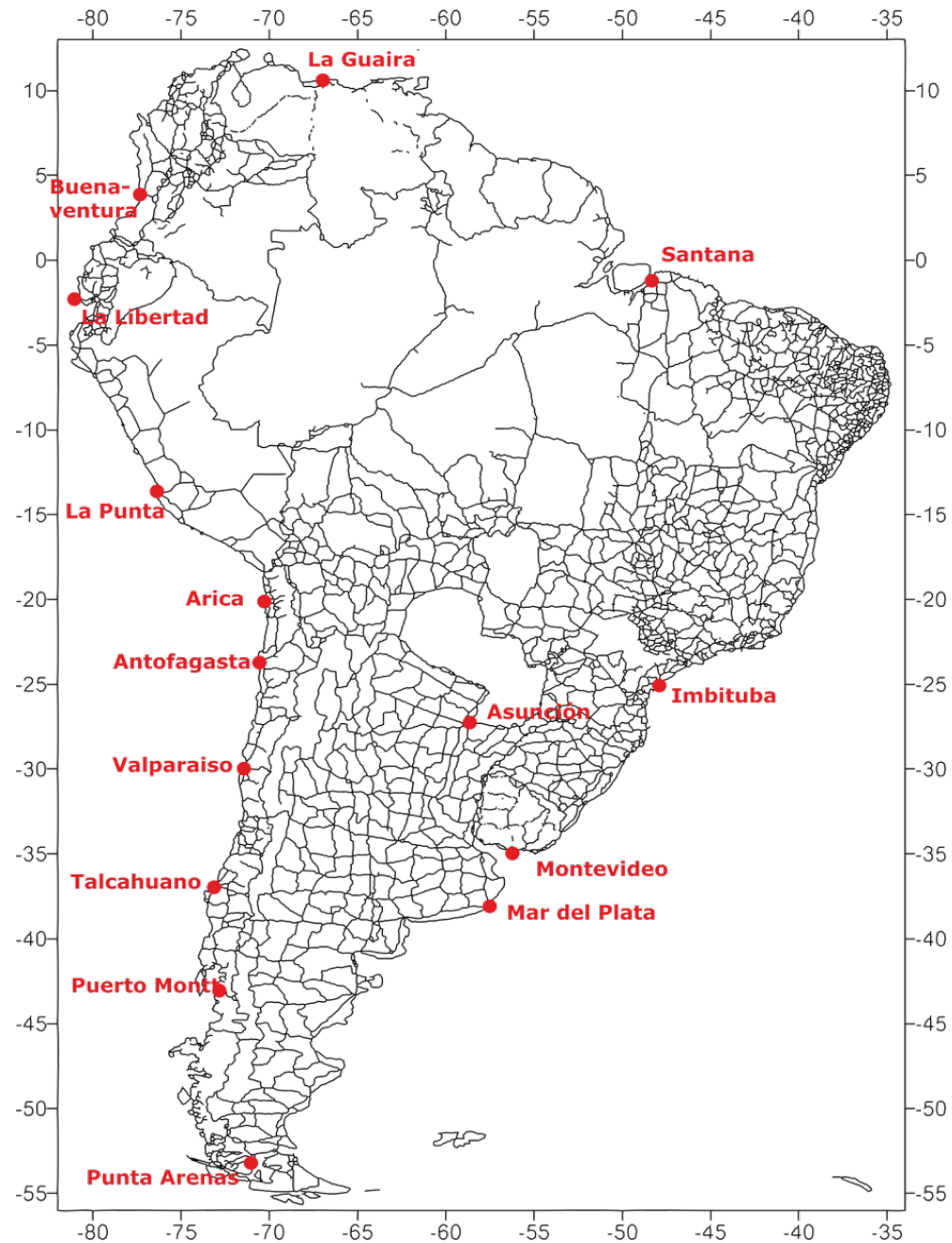


# Características de los sistemas de alturas existentes en América del Sur

Tomado de: Lauría et al. 2002, Sánchez and Martínez 2002, Subiza et al. 2002, Hernández et al. 2002, Sánchez 2005

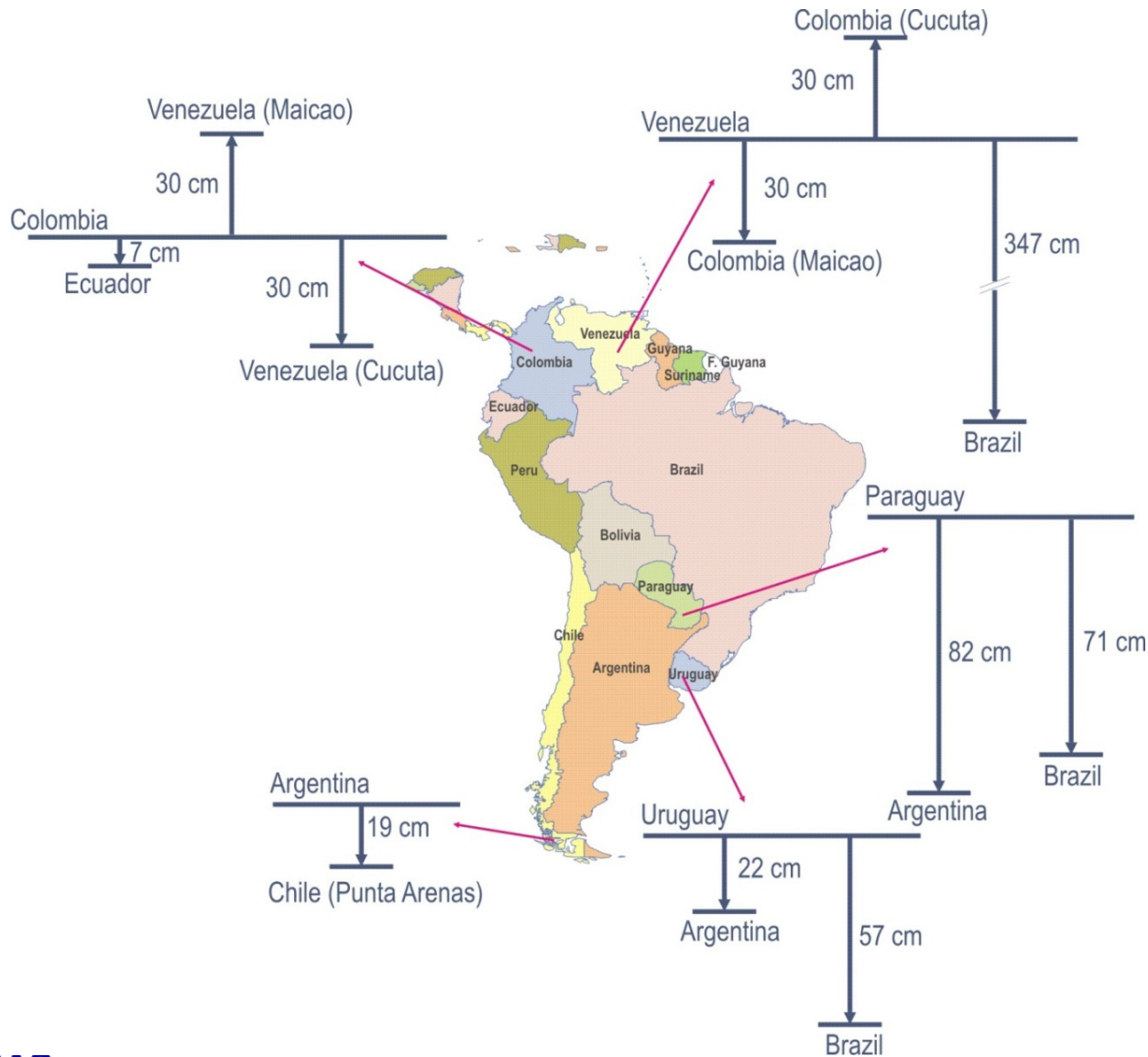
País	Mareógrafo		Red vertical			Estándares	
	Nombre	Época del nmm	Extensión [km] 1. orden 2. orden	Cantidad de puntos 1. orden 2. orden	Medición	Corrección mareas	Corrección gravimétrica
Argentina	Mar del Plata Desde 1950 PARN: Punto Altimétrico de Referencia Normal (Tándil), 200 km v. Pegel	1924	64 000 13 000	16 320 7 600	1940 - 2010	?	Ortométrica ?
Bolivia	Arica (Chile)	?	25 388 1 923	12 208 865	?	?	?
Brasil	Imbituba Santana	1949 ?	160 000	65 000	1945 - 2010	no	Ortométrica con gravedad normal
Chile	Valparaíso Arica Antofagasta San Antonio Talcahuano Pto Montt Pta Arenas	1941 ? ? ? ? ? ?	11 550 1 750	8 592 1 138	1950 - 2010	?	?
Colombia	Buenaventura	1951	18 900 6 500	13 065 5 938	1950 - 2010	no	Antes de 1985 ortométrica con gravedad normal
Ecuador	La Libertad	1948	11 200 200	7 500 150	1950 - 2010	?	?
Paraguay	?	?	?	?	?	?	?
Peru	La Punta	1954	?	8 723 2 168	?	?	?
Uruguay	Montevideo	1948	3 883 3 836	1 347 835	1950 - 2010	no	ortométrica
Venezuela	La Guaira	?	?	?	?	?	?

# Marcos de referencia vertical en América del Sur



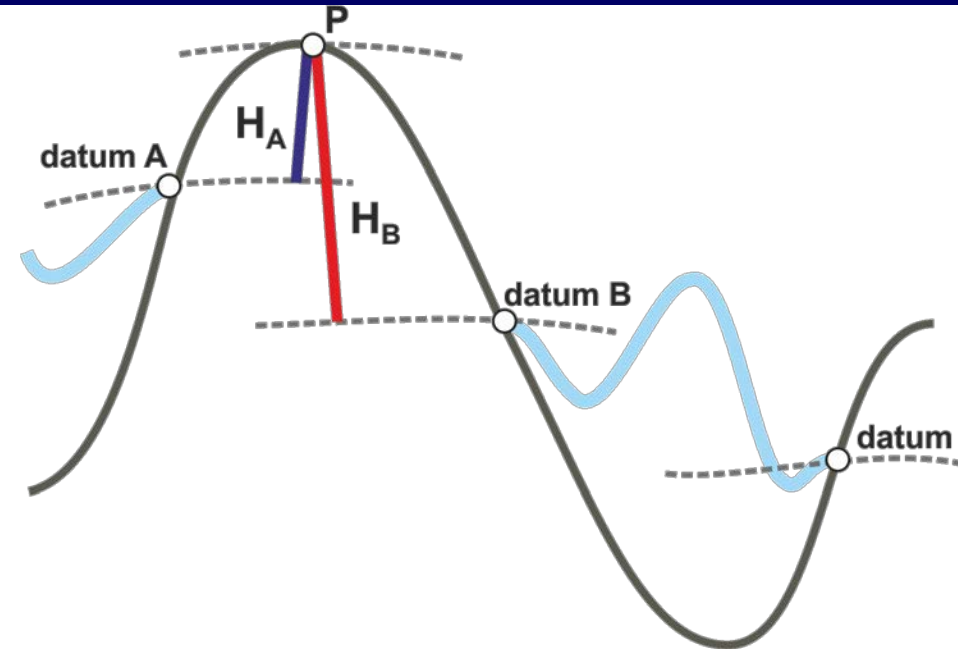
# Marcos de referencia vertical en América del Sur

status 2000!!!



# Sistemas de alturas existentes en América del Sur

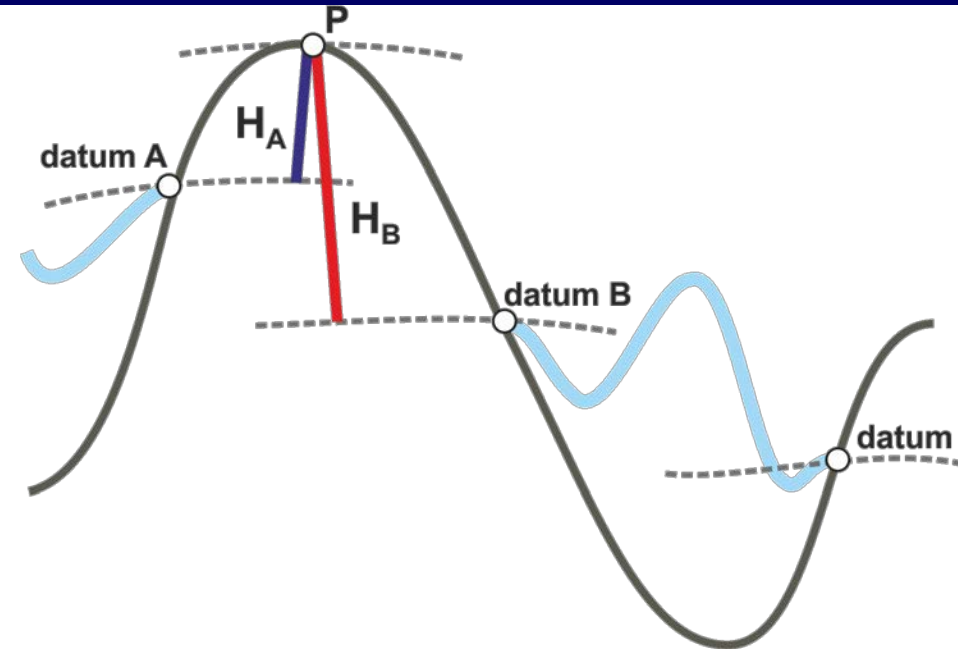
- se refieren a diferentes niveles (varios [dm] de discrepancia);
- materializan diferentes tipos de alturas (ortométricas con diferentes hipótesis), algunos casos no incluyen reducción gravimétrica,
- omiten cambios verticales en mar y áreas continentales,
- las redes de nivelación han sido ajustadas línea por línea o circuito por circuito o individualmente por país;
- dificultan la combinación precisa de h-H-N



# Sistemas de alturas existentes en América del Sur

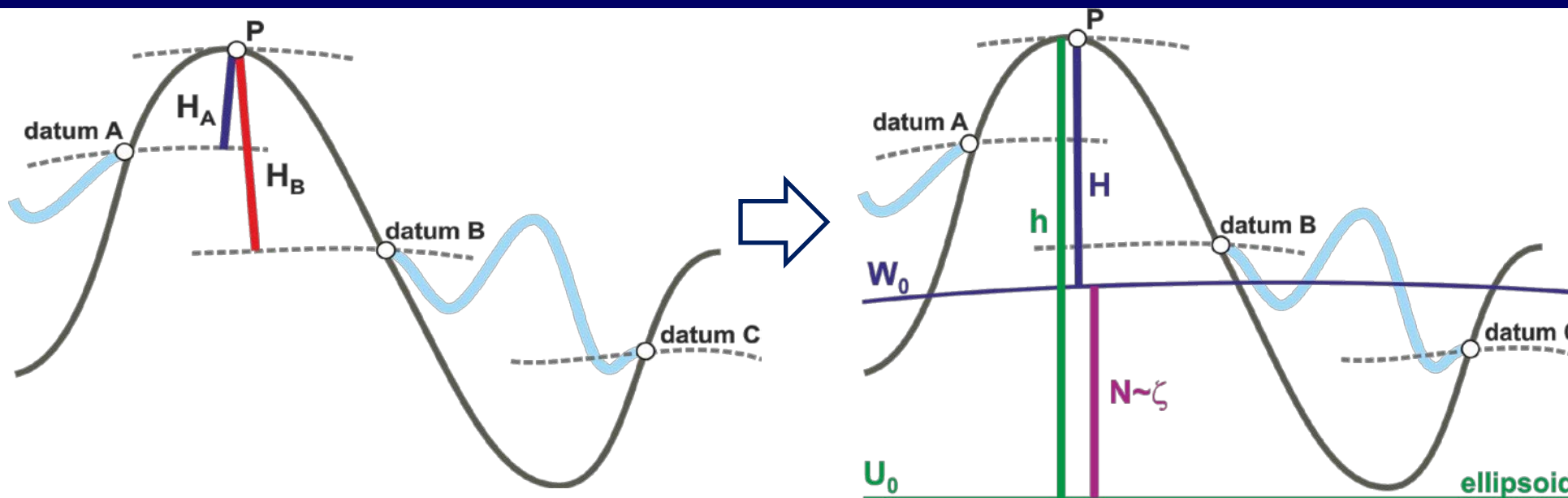
## PERO...

- son la base para la información vertical producida en los últimos 100 años;
- no pueden ser reemplazados por alturas elipsoidales (éstas no describen la trayectoria del agua);
- nivelación es mucho más precisa que los modelos de geoide existentes.



**Los sistemas de alturas existentes no pueden *botarse a la basura*; deben ser modernizados mediante su integración en un sistema de referencia vertical global!**

# Nuevo sistema de referencia vertical SIRGAS: objetivos

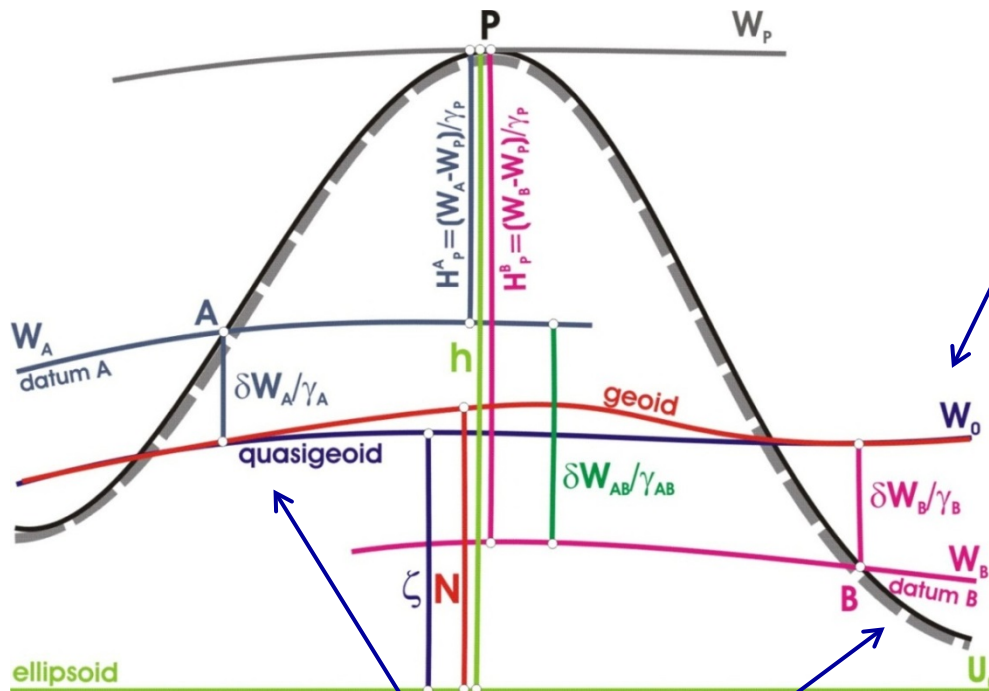


- Referir todas las alturas físicas a la misma superficie de nivel, definida y realizada en un contexto **global**;
- Satisfacer  **$h-H-N=0$**  con precisión centimétrica en toda el área SIRGAS;
- Materialización similar a **SIRGAS**, es decir
  - Fiduciales de una **red global** con coordenadas verticales precisas;
  - **Una densificación regional y densificaciones nacionales**, i.e. integración (transformación) de los sistemas de alturas existentes.



# Nuevo sistema de referencia vertical SIRGAS: estrategia

Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014



1. Selección (**Definición y materialización**) de un nivel global de referencia  $W_0$ , en concordancia con las Resoluciones de la **Asociación Internacional de Geodesia**, **ver póster: Towards a new best estimate for the conventional value of  $W_0$**  (Sánchez et. al. 2014)

2. Conexión de los niveles locales  $W_i$  con el nivel global  $W_0$ 
  - Estrategias para la unificación de datums verticales.

# Nuevo sistema de referencia vertical SIRGAS: realización

- 1) Establecimiento de un marco de referencia continental que incluya los mareógrafos de referencia, nodos de nivelación, estaciones de referencia SIRGAS;
- 2) Conexión de las redes verticales de primer orden entre países vecinos y ajuste continental en un solo bloque;
- 3) Cálculo del potencial anómalo  $T_j$  (solución del GBVP) y comparación con el marco de referencia geométrico ( $\gamma h$ ) y números geopotenciales en tres escenarios:

## Áreas oceánicas

(SSTop en mareógrafos)

- $h$  de altimetría satelital + registros mareográficos;
- $C_i$  = números geopotenciales oceánicos ( $=\gamma DT$ );
- $T_i$  GGM satelital ( $n=200$ ).

## Áreas costeras

(mareógrafos)

- $h$  posicionamiento GNSS en mareógrafos de referencia;
- $C_i = 0$ ;
- $T_i$  GGM satelital + gravimetría terrestre (marina, aérea).

## Áreas continentales

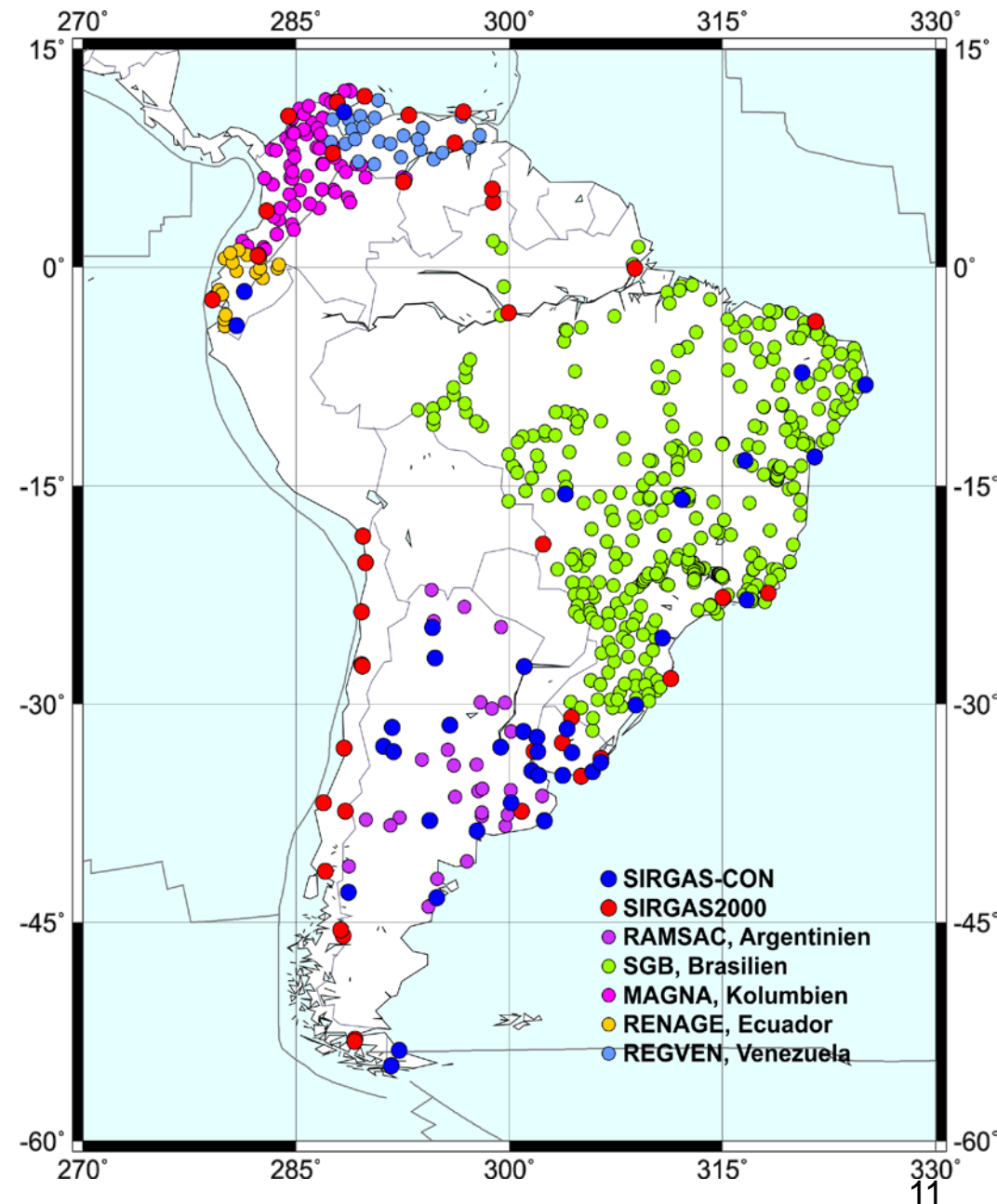
(estaciones de referencia)

- $h$  posicionamiento GNSS en estaciones SIRGAS, nodos de nivelación, puntos fronterizos,
- $C_i$  números geopotenciales derivados de nivelación,
- $T_i$  GGM satelital + gravimetría terrestre (aérea, marina).

- 4) Ajuste por mínimos cuadrados de (2) y (3).

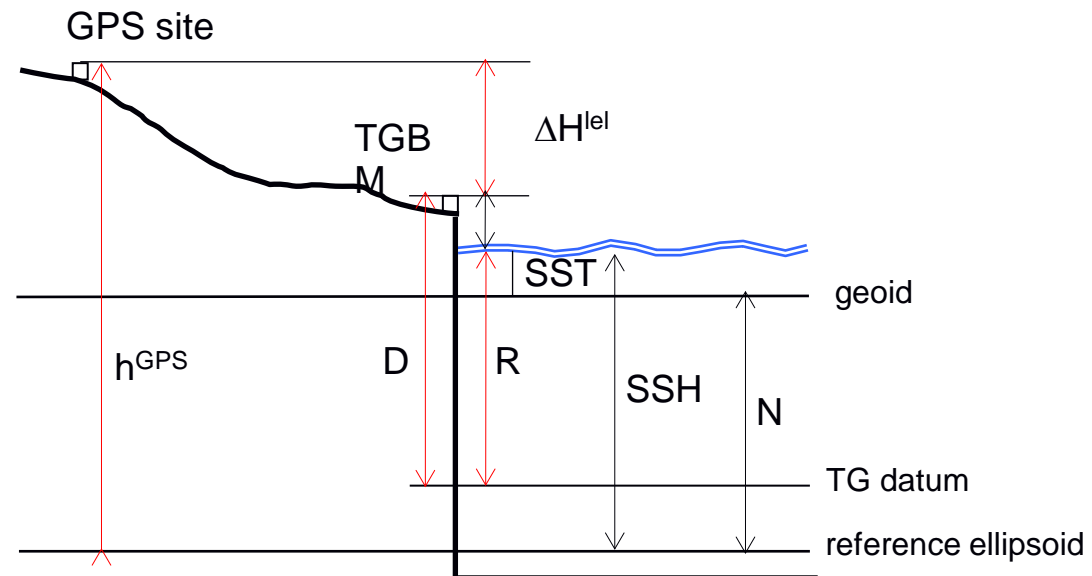
# Datos de entrada: Alturas elipsoidales en áreas continentales

1. Estaciones de referencia: SIRGAS2000, SIRGAS-CON, densificaciones nacionales;
2. Transformación a IGb08;
3. Reducción a la misma época de referencia (2005.0): con velocidades de las estaciones o con VEMOS,
4. Transformación al sistema zero(=mean) tide



# Datos de entrada: Alturas elipsoidales en áreas marinas y costeras (mareógrafos)

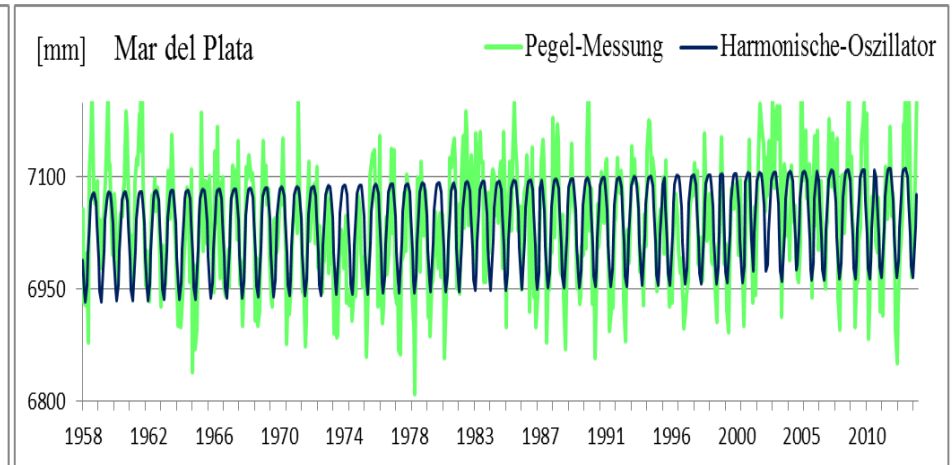
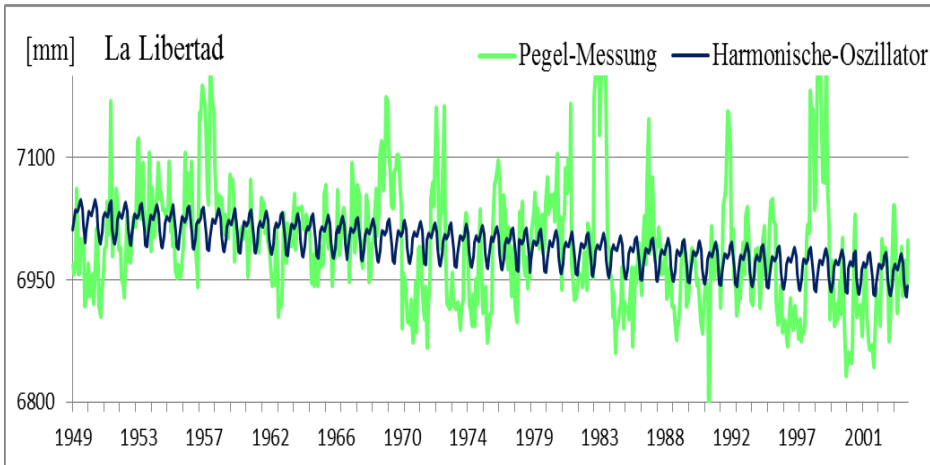
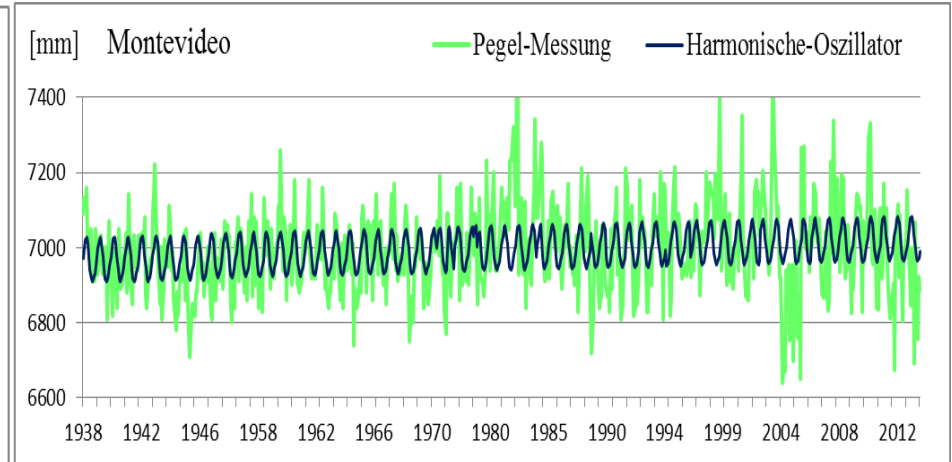
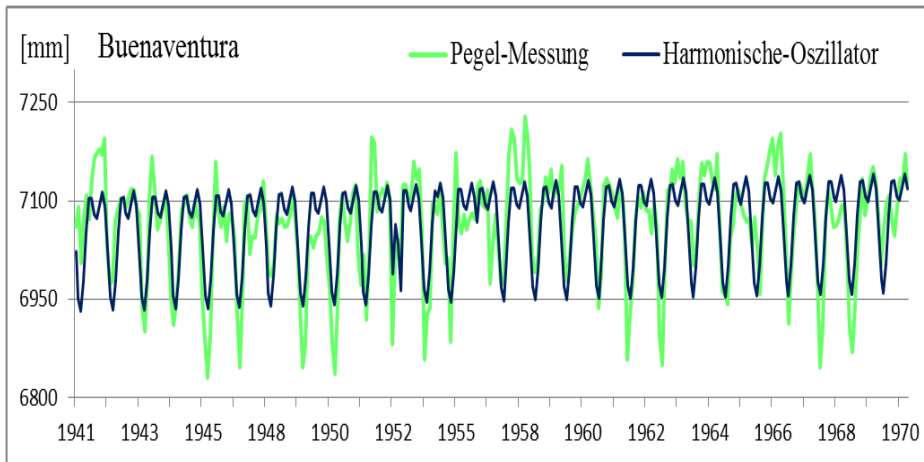
1. Posicionamiento GNSS en mareógrafos de referencia para vincularlos al ITRF y para estimar mov. verticales de la corteza;
2. Cálculo de la tendencia del nmm a partir de registros mareográficos;
3. Estimación del cambio "real" del nmm (resultados en 2 menos resultados en 1);
4. Verificación mediante cálculo de la tendencia del nmm a partir de altimetría satelital:
5. Con la tendencia estimada se reduce la altura del mar a la época 2005.0.



# Datos de entrada: Alturas elipsoidales en áreas marinas y costeras (mareógrafos)

Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014

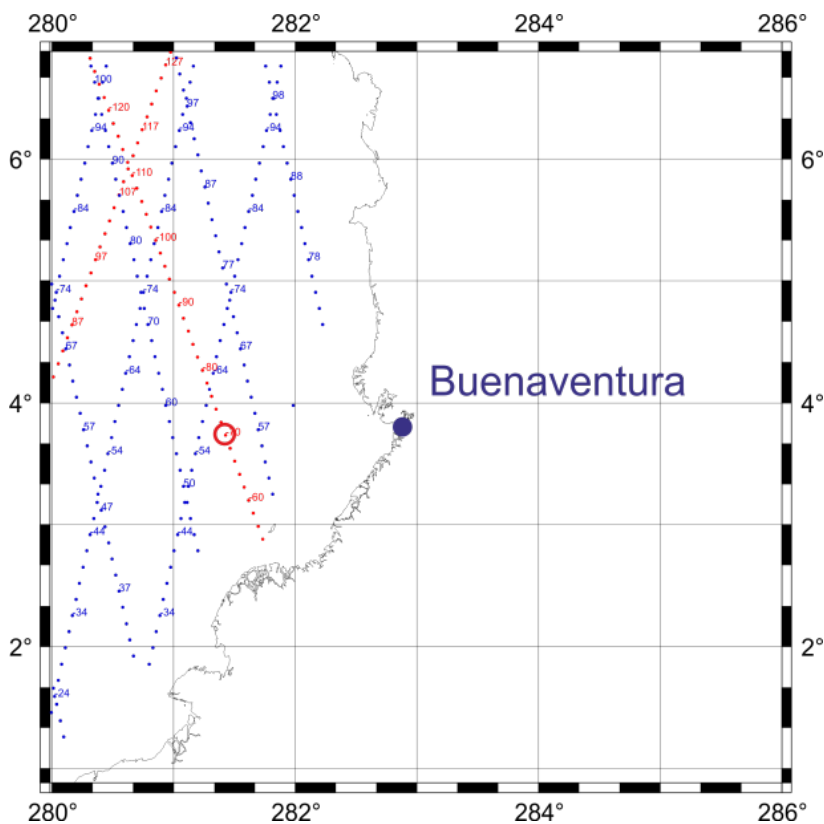
Registros mareográficos representados mediante un oscilador de doble frecuencia (datos tomados del PSMSL, Holgate et al. 2013)



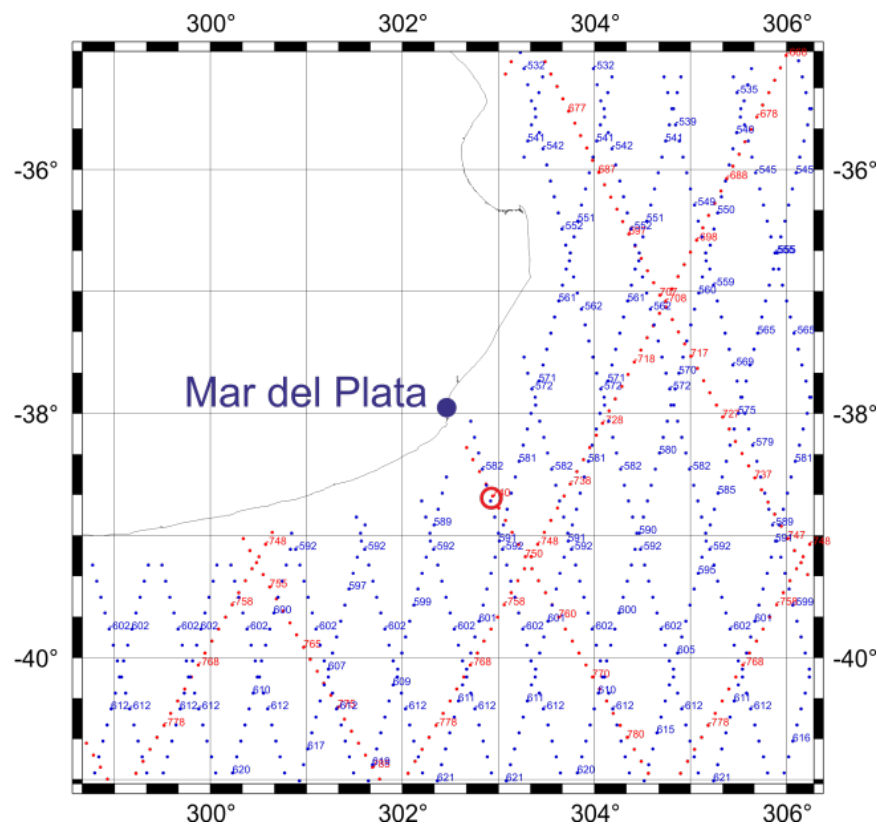
# Datos de entrada: Alturas elipsoidales en áreas marinas y mareógrafos

Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014

**Cambios en el nmm a partir de altimetría satelital (datos tomados de OpenADB Schwatke et al. 2010)**



BIN No.	No. Obs.	Trend [mm/y]
68	247	-3,3 ± 8,1
69	93	-2,7 ± 4,7
<b>70</b>	<b>322</b>	<b>-1,3 ± 1,0</b>
71	327	-1,2 ± 0,8



BIN No.	No. Obs.	Trend [mm/y]
582	229	-2,2 ± 0,9
583	318	-2,8 ± 1,9
<b>584</b>	<b>326</b>	<b>-2,4 ± 0,8</b>
585	333	-3,4 ± 0,7



# Datos de entrada: Alturas elipsoidales en áreas marinas

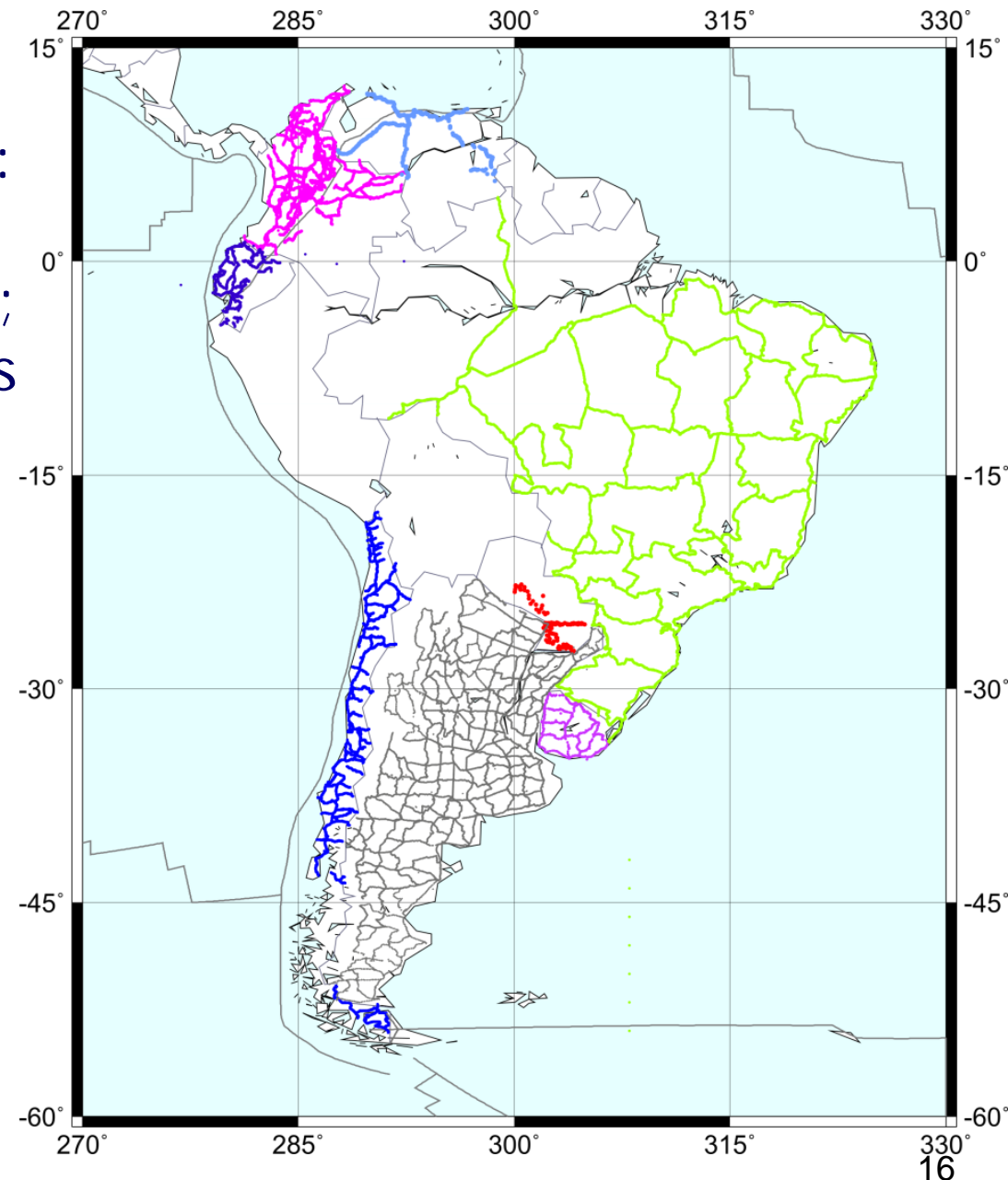
Cambios en el nmm derivados de:

- 1) GNSS + Mareógrafos
- 2) Altimetría satelital

País	Mareógrafo	GNSS		Mareógrafo		Altimetría satelital	
		Trend [mm/a]	Periodo	Trend [mm/a]	Periodo	Trend [mm/a]	Periodo
Argentina	Mar del Plata	2,2 ± 2,2	2002.7-2008.2	0,6 ± 0,2	1957.5-2012.9	2,4 ± 0,8	1993.9-2013.9
Brasil	Imbituba	-0,1 ± 1,1	2007.8-2011.4	-1,0 ± 0,6	1948.7-1969.0	2,8 ± 1,0	1993.9-2013.9
Brasil	Santana			158 ± 136	1984.0-1984.9	6,5 ± 2,4	1993.9-2013.9
Chile	Arica			-1,1 ± 0,3	1950.9-1992.0	1,1 ± 1,4	1993.9-2013.9
Chile	Antofagasta			-1,3 ± 0,1	1945.9-1993.0	1,4 ± 1,3	1993.9-2013.9
Chile	Punta Arenas			-5,7 ± 5,5	1964.6-1970.9	-4,8 ± 3,1	1993.9-2013.9
Chile	Valparaiso	-2,4 ± 1,0	2000.5-2010.1	1,4 ± 0,1	1944.0-2012.9	0,9 ± 1,1	1993.9-2013.9
Chile	Puerto Montt					1,0 ± 1,5	1993.9-2013.9
Chile	Talcahuano			2,0 ± 0,3	1949.6-1991.9	3,6 ± 2,2	1993.9-2013.9
Colombia	Buenaventura	1,6 ± 1,5	2005.8-2011.4	1,0 ± 0,3	1941.0-1969.9	1,3 ± 1,0	1993.9-2013.9
Ecuador	La Libertad			-1,2 ± 0,2	1948.8-2003.8	0,7 ± 1,1	1993.9-2013.9
Perú	La Punta	1,5 ± 2,0	2009.2-2011.2			0,8 ± 0,9	1993.9-2013.9
Uruguay	Montevideo	1,6 ± 2,1	1995.4-2000.4	0,8 ± 0,2	1938.0-2013.8	-2,8 ± 1,2	1993.9-2013.9
Venezuela	La Guaira					2,9 ± 0,8	1993.9-2013.9

# Datos de entrada: Números geopotenciales

1. Desniveles proporcionados por los países miembros de SIRGAS al GTIII (Argentina: ecuaciones normales, los demás desniveles medidos);
2. Identificación de conexiones internacionales (algunas simulaciones);
3. Ajuste cinemático de las redes de nivelación asumiendo que  $dh/dt \cong dH/dt$
4. Ajuste posible en Ecuador, Colombia, Venezuela, Brasil y Uruguay
5. Alturas normales.





# Datos de entrada: Anomalías de altura

Tres escenarios:

- 1) Gravedad disponible: cálculo del cuasigeoide, posible en Ecuador, Colombia, Venezuela;
- 2) (Cuasi-)geoide disponible, pero no gravedad: estandarización de la componente *global*, posible en Brasil (MAPGEO2010), Colombia (QGEOCOL2004), UruGeoide2007 (Uruguay), VGM2010 (Venezuela):
  - P. ej. MAPGEO2010: EGM2008 (n=150) + gravedad local + efectos topográficos

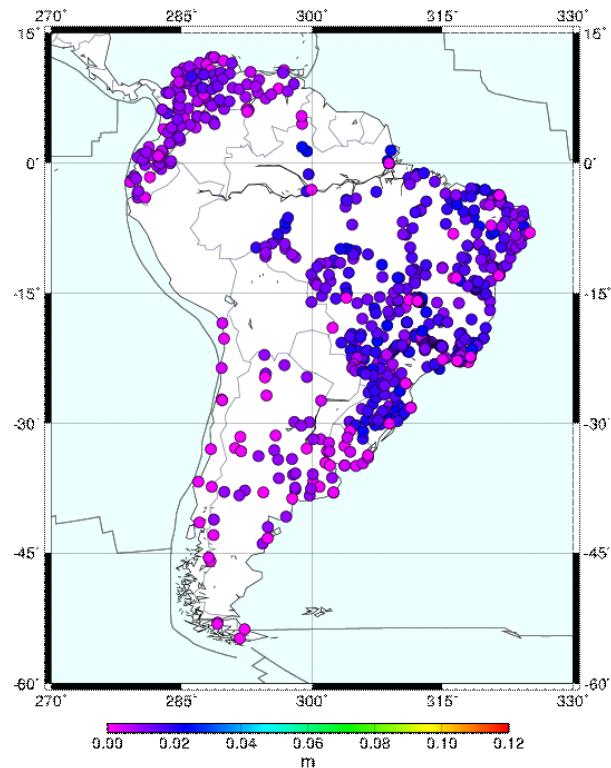
$$\zeta_{Nacionales Model}^{Regional} = \zeta_{Nacionales Model} - \zeta_{GGM, n=150}$$

$$\zeta_{Standardisertes National-Model} = \zeta_{Nacionales Model}^{Regional} + \zeta_{EIGEN-6C, n=150}$$

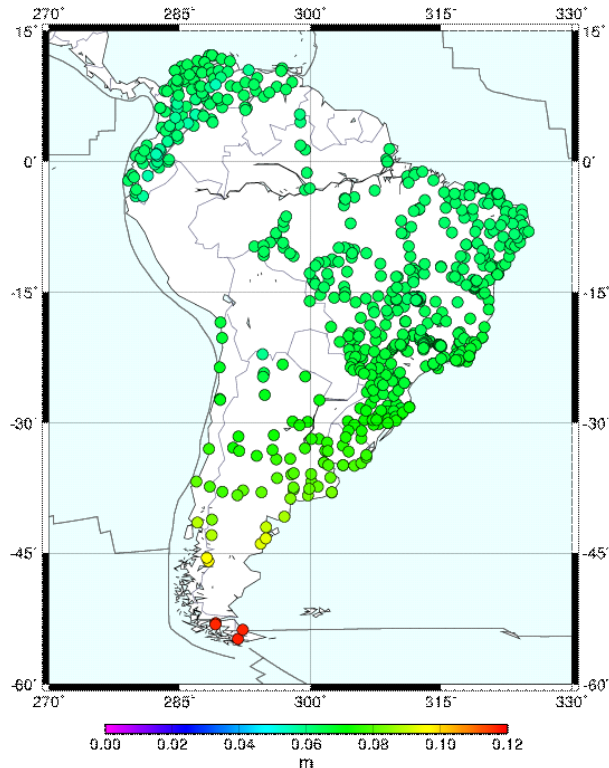
- 3) No disponibilidad de (cuasi-)geoide o gravedad: uso del modelo EIGEN-6C3stat;
- 4) Los geoides de Uruguay y Venezuela se transforman a cuasi-geoides utilizando anomalías Bouguer.

# Precisión de los datos de entrada

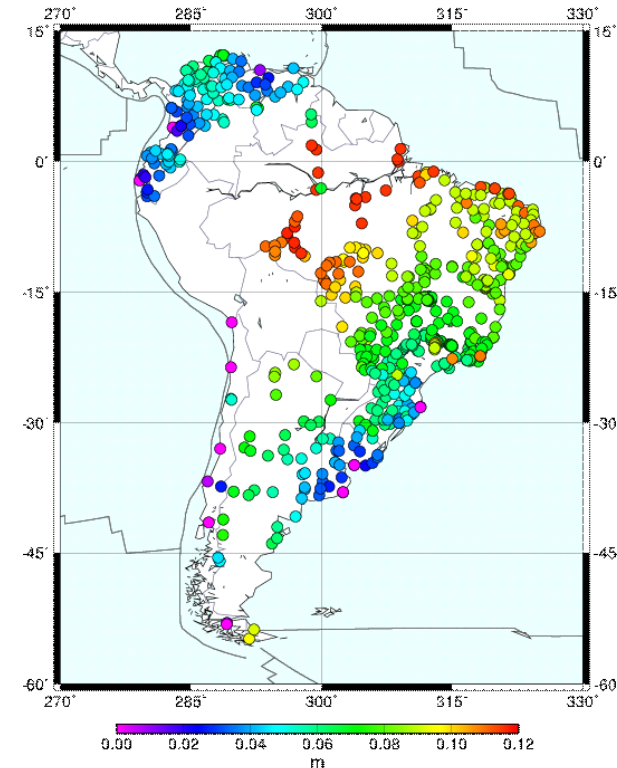
Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014



*Alturas elipsoidales*



*Anomalías de altura*



*Alturas físicas (bzw. niveladas)*

# Ecuaciones de observación en la unificación de los sistemas verticales existentes en América del Sur

Solución del *scalar-free* GVBP (Molodenskii) y comparación con  $h$  y  $H^N$ :

1) En mareógrafos (14), puntos nodales y estaciones SIRGAS (663):

$$h(P) - H^{N,i}(P) - q\Delta W_0 - E(\zeta(P)) = e^i(P) \delta W_0^i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^J f_0^j(P) \delta W_0^j(P)$$

2) En estaciones fronterizas (7):

$$H^{N,i+1}(P) - H^{N,i}(P) = q(\delta W_0^{i+1} - \delta W_0^i)$$

Existe tantas ecuaciones como puntos disponibles (684) y las incógnitas  $\delta W_j$  se determinan mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

$$\delta W_0^j = W_0 - W_0^j \quad \Delta W = W_0 - U_0 \quad q := -\frac{1}{\gamma}, \quad e^i(P) := -q + f_0^i(P), \quad f_0^i(P) := \frac{1}{2\pi\gamma} \iint_{\sigma_i} S(\psi_{P,P_k}) d\sigma$$

$$E(\zeta(P)) := \frac{G\delta M}{R\gamma} + \sum_{i=1}^J \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_i} (\Delta g^i(P_k) + g_1^i(P_k)) S(\psi(P, P_k)) d\sigma + \delta T_E(P)$$

# Ecuaciones de observación en la unificación de los sistemas verticales existentes en América del Sur

## Ajuste por mínimos cuadrados

El sistema de ecuaciones de observación tiene la forma

$$\hat{\mathbf{b}} = \boldsymbol{\psi}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{b} + \mathbf{v} = \boldsymbol{\psi}(x_0) + \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad ; \quad \mathbf{A} = (\partial \boldsymbol{\psi}(\hat{x}) / \partial \hat{x})$$

El vector de mediciones  $\mathbf{b}$  contiene los elementos:

$$\left[ h(P) - H^{N,i}(P) - q\Delta W_0 - E(\zeta(P)) \right] \quad \left[ H^{N,i+1}(P) - H^{N,i}(P) \right]$$

La matriz  $\mathbf{A}$  está conformada por:

$$1, -1, q, -q, e_j, f_0^i$$

El vector de las incógnitas  $\Delta \hat{\mathbf{x}}$  contiene

$$\delta W_j; \quad j = 1 \dots J$$

La solución está dada por:

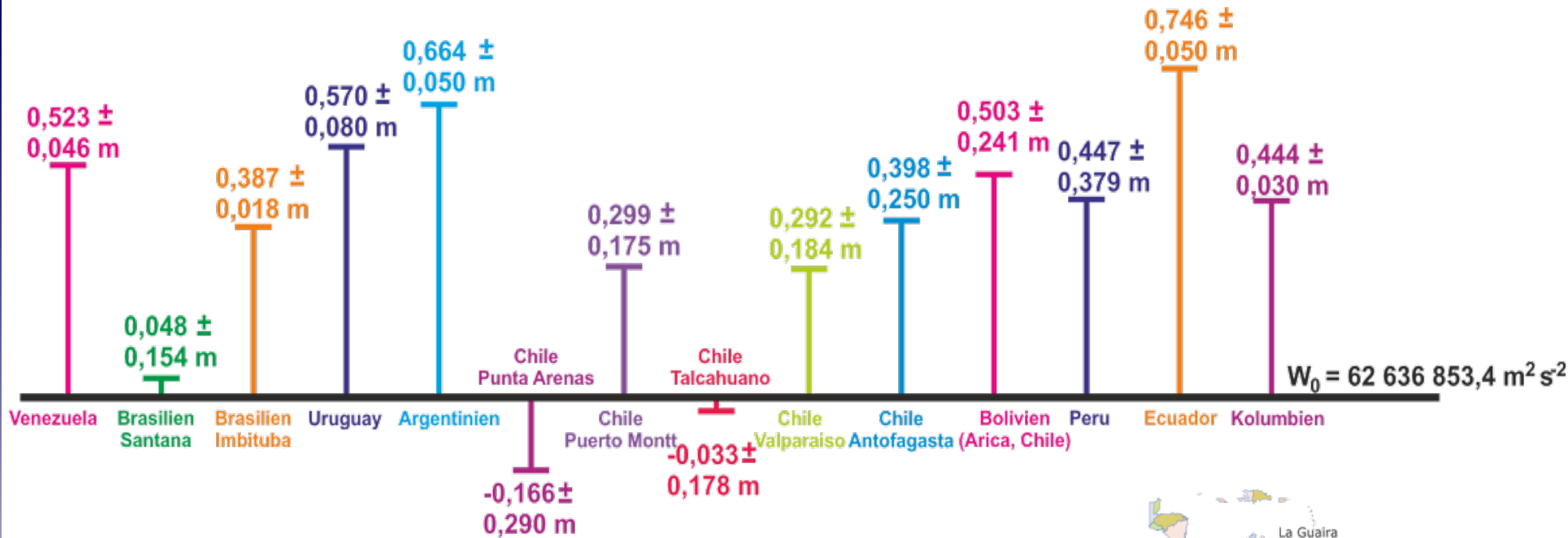
$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{x}} - (\mathbf{b} - \boldsymbol{\psi}(x_0)) = \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{x}} - l$$

$$\hat{\mathbf{x}} = x_0 + \Delta \hat{\mathbf{x}}$$

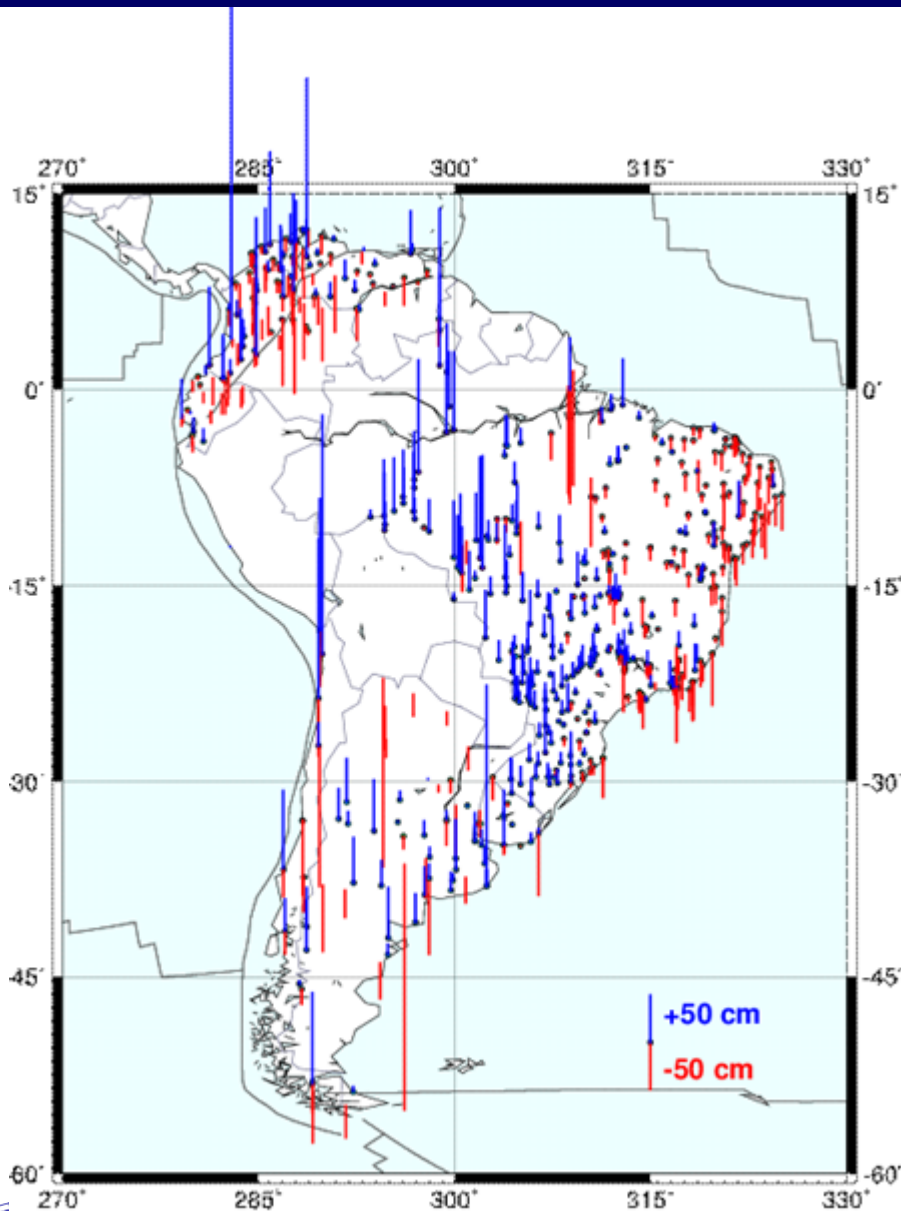
$$l = \mathbf{b} - \boldsymbol{\psi}(x_0)$$

# Parámetros de unificación de los sistemas verticales existentes en América del Sur

Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014

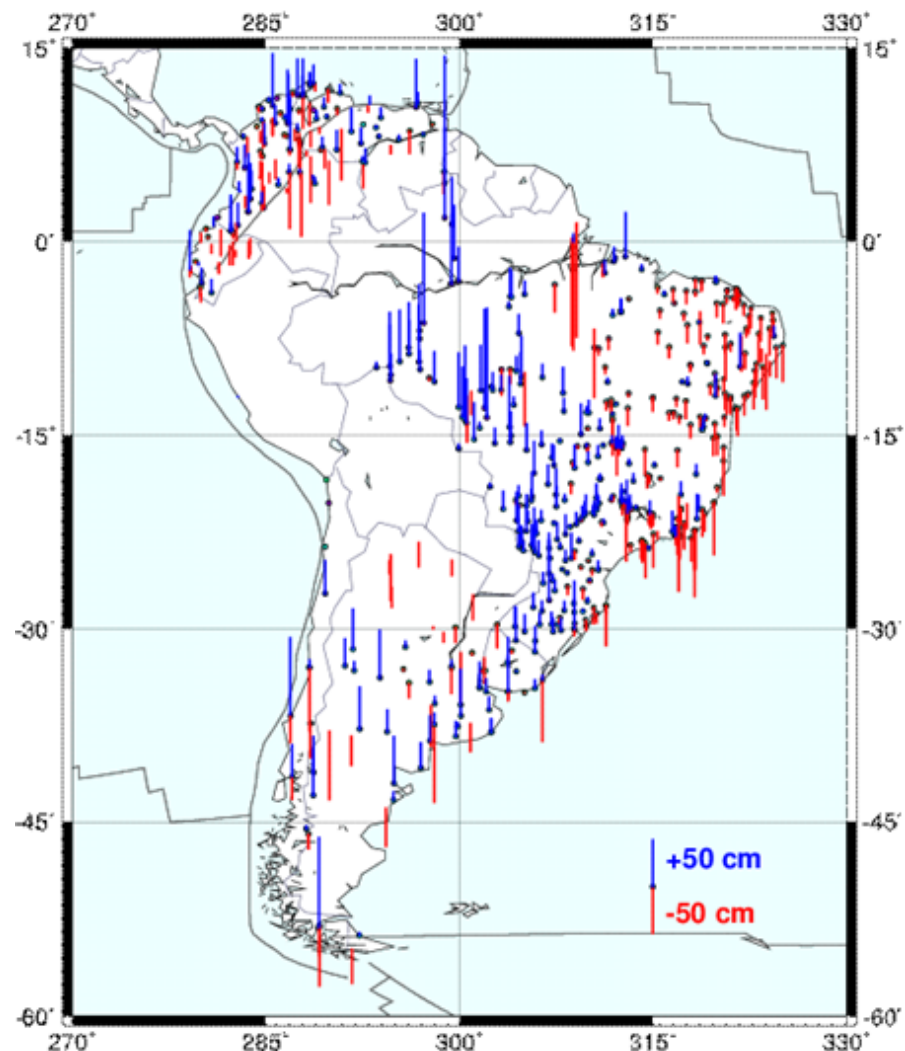


# Residuales: con datos „originales“ (tal cual están)



# Residuales: con datos „depurados“: ajuste cinemático, homogeneización de los modelos de cuasigeoide, etc.

Simposio SIRGAS 2014  
La Paz, Bolivia. Noviembre 24, 2014



# Cómo mejorar estos resultados

- 1) Nivelación de las estaciones SIRGAS-CON;
- 2) Más conexiones de las redes verticales entre países vecinos;
- 3) Datos en Perú, Bolivia y Paraguay;
- 4) Ajuste (cinemático) continental (en un bloque) de las redes de primer orden en términos de números geopotenciales;
- 5) Modelado del cuasigeoide utilizando el mismo GGM para la componente de longitud de onda larga;
- 6) Extensión (interpolación) de las mediciones de altimetría satelital a las zonas costeras;
- 7) Proceso iterativo:
  - Con los parámetros de unificación obtenidos, se recalculan las alturas normales y las anomalías de gravedad;
  - Se calcula nuevamente el cuasigeoide;
  - Se hace de nuevo el ajuste para mejorar los parámetros de unificación
  - y así sucesivamente hasta obtener convergencia.