

---

# Modernización de los sistemas de alturas existentes en América Latina y el Caribe

SIRGAS-WGIII (Datum Vertical)

Laura Sánchez  
[sanchez@dgfi.badw.de](mailto:sanchez@dgfi.badw.de)



SIRGAS Workshop  
Heredia, Costa Rica, noviembre 27 y 28 de 2006

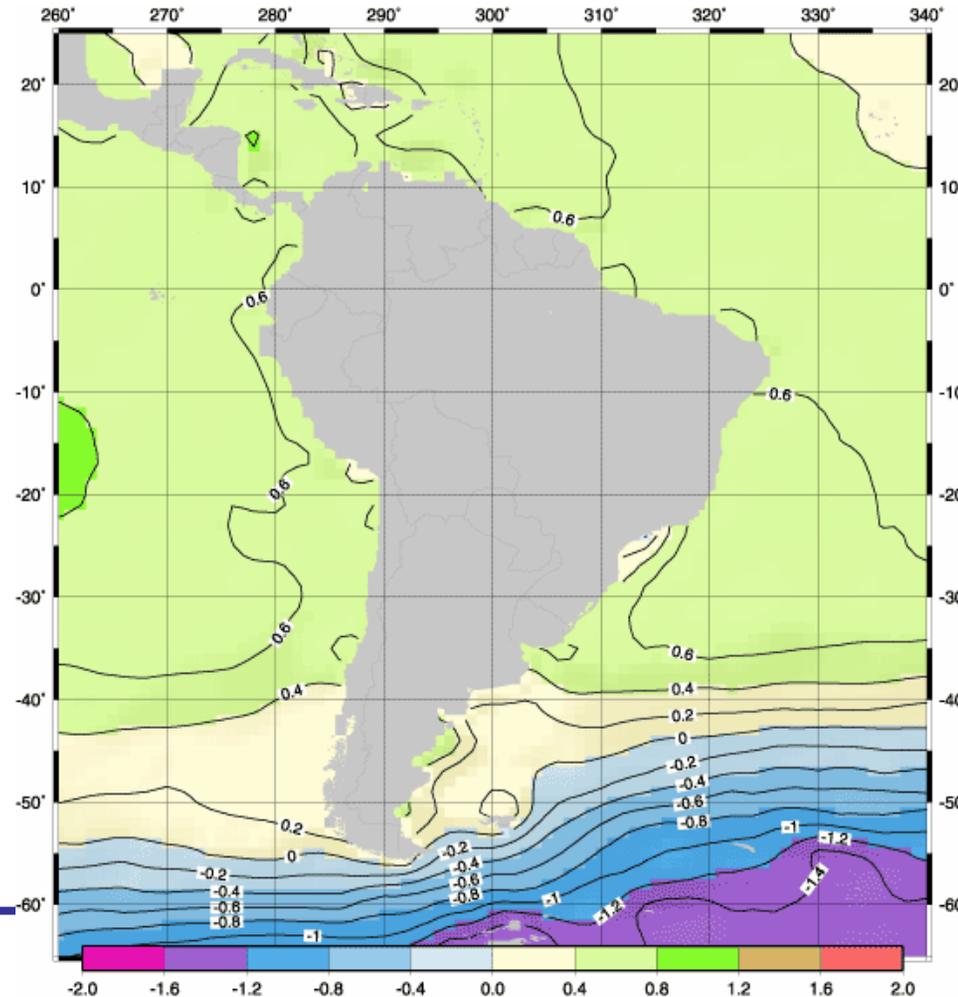
---

# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareógrafos de referencia. Sus principales características son:
  - Se refieren a **diferentes mareógrafos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.

La diferencia entre el nivel medio del mar y el geoide se conoce como **topografía de la superficie del mar** (SSTop). Sus magnitudes varían entre **-2 m y +2 m** a nivel global.

La SSTop nos permite identificar las discrepancias existentes entre el nivel medio del mar registrado en dos puntos diferentes. Por ejemplo, en el mareógrafo de referencia de Brasil (Imbituba) la SSTop es de 20 cm, mientras que en el de Colombia (Buenaventura) es de 60 cm, es decir que estos dos niveles de referencia tienen una discrepancia de 40 cm, sólo por la variación del nivel medio del mar de una lugar a otro.



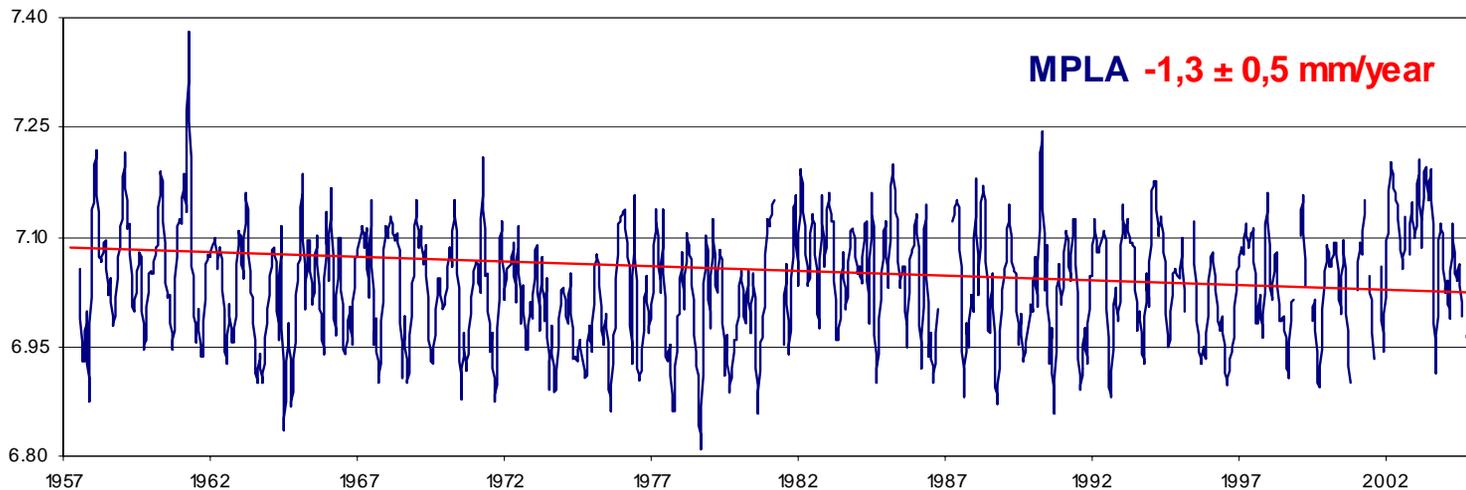
# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareógrafos de referencia. Sus principales características son:

- Se refieren a **diferentes mareógrafos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.

Pero el nivel medio del mar también varía a través del tiempo. Es decir, el nivel registrado en un mareógrafo de referencia durante el período de definición, definitivamente no es el mismo que se registraría si se tomara otra época para definir la altura cero en ese mismo mareógrafo.

Por ejemplo, en el mareógrafo Mar del Plata (Argentina) se ha registrado un descenso del nivel medio del mar de 1,3 mm por año, es decir que el nivel medio del mar registrado en la década de los años 50 estaba 7 cm “más arriba” que el nivel actual.



# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareografos de referencia. Sus principales características son:
  - Se refieren a **diferentes mareografos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.
  - Puntos de nivelación ubicados en zonas fronterizas presentan alturas diferentes, dichas diferencias incluyen además de las discrepancias entre el nivel medio del mar de referencia individual, los errores sistemáticos de la nivelación geométrica.

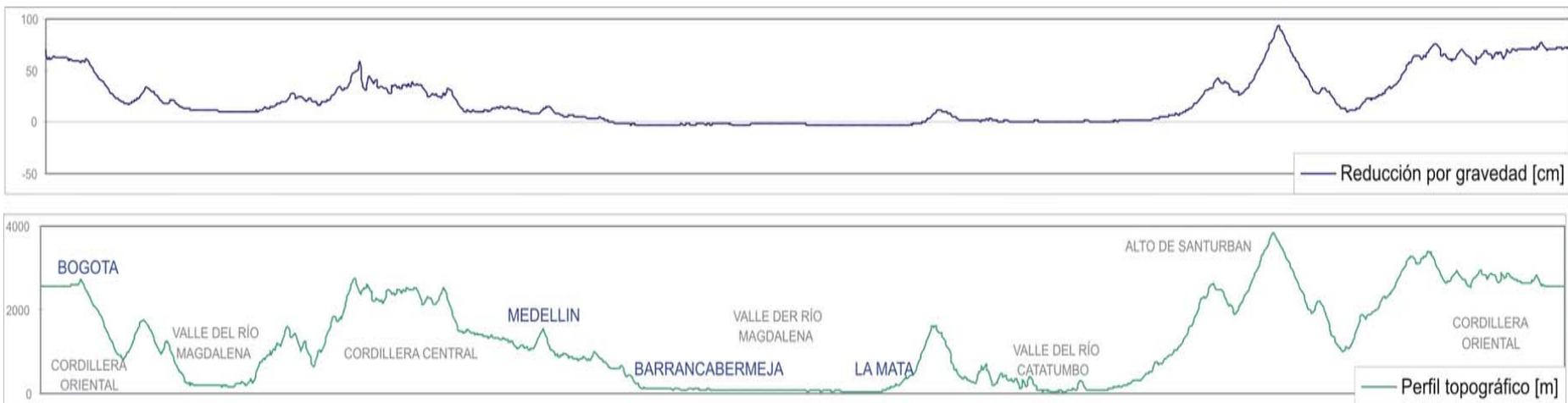


Discrepancias en las alturas niveladas entre países vecinos en América del Sur

# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareografos de referencia. Sus principales características son:
  - Se refieren a **diferentes mareografos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.
  - Puntos de nivelación ubicados en zonas fronterizas presentan alturas diferentes, dichas diferencias incluyen además de las discrepancias entre el nivel medio del mar de referencia individual, los errores sistemáticos de la nivelación geométrica.
  - En general, la nivelación geométrica utilizada para el establecimiento de las redes verticales o **no ha sido corregida** por efectos del campo de gravedad, o ha sido corregida con **diferentes reducciones** (ortométricas). Esto genera incertidumbres hasta de **1,20 m** en las alturas utilizadas actualmente.

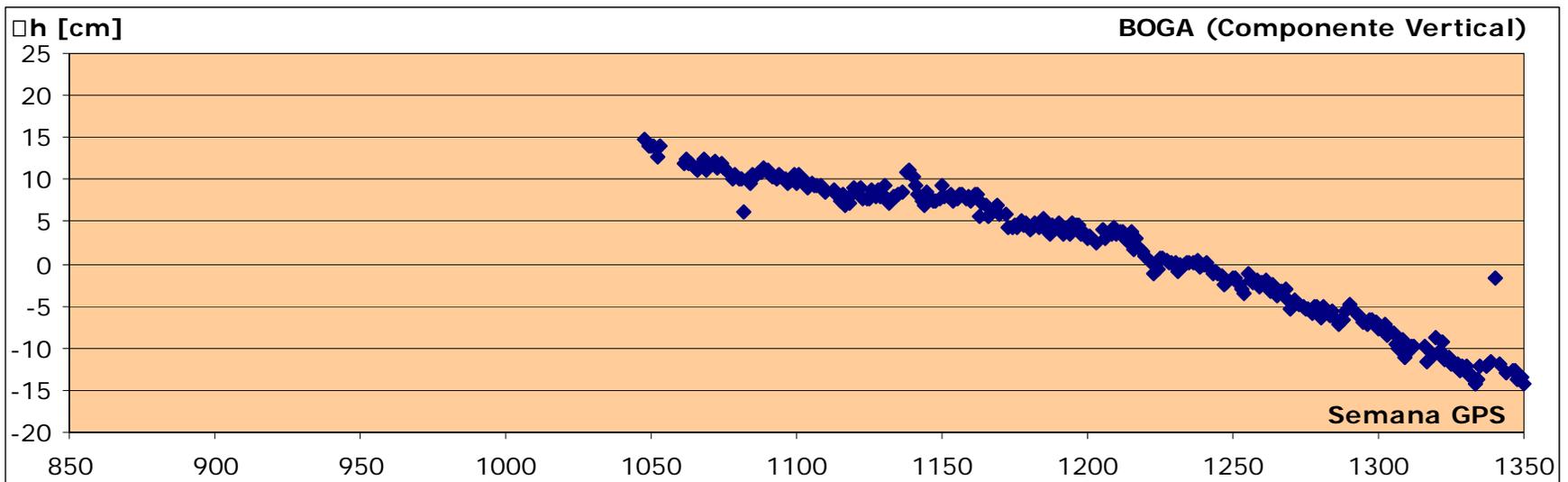
Efecto [cm] del campo de gravedad sobre la nivelación geométrica realizada en un circuito con ~ 1500 puntos (~1800 km) y diferencias de altura entre 15 y 4000m



# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareografos de referencia. Sus principales características son:
  - Se refieren a **diferentes mareografos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.
  - Puntos de nivelación ubicados en zonas fronterizas presentan alturas diferentes, dichas diferencias incluyen además de las discrepancias entre el nivel medio del mar de referencia individual, los errores sistemáticos de la nivelación geométrica.
  - En general, la nivelación geométrica utilizada para el establecimiento de las redes verticales o **no ha sido corregida** por efectos del campo de gravedad, o ha sido corregida con **diferentes reducciones** (ortométricas). Esto genera incertidumbres hasta de **1,20 m** en las alturas utilizadas actualmente.
  - Las redes verticales han sido medidas por tramos en **diferentes épocas** y en su procesamiento no se ha tenido en cuenta el **cambio de las alturas** a través del **tiempo**. Así, los movimientos verticales, que pueden alcanzar **varios decímetros**, han sido asumidos como errores de observación.

Mediante posicionamiento GNSS ha sido posible determinar con alta precisión la variación de las coordenadas a través del tiempo. Por ejemplo, la estación permanente BOGA (Bogotá) registra un hundimiento de 4 cm por año. Es indudable que si a altura elipsoidal del punto cambia, la altura nivelada también cambia. Si se tiene presente que la nivelación geométrica de ese punto específico se realizó hace 50 años, podemos estar seguros de que el punto actualmente se encuentra 2 m por debajo de la posición que indica la altura nivelada utilizada.



# Motivación

1. En América Latina existen tantos sistemas de alturas físicas (dependientes del campo de gravedad), como mareógrafos de referencia. Sus principales características son:
  - Se refieren a **diferentes mareógrafos** y a **diferentes épocas**, esto genera inconsistencias entre ellos en el rango de **2 m**.
  - Puntos de nivelación ubicados en zonas fronterizas presentan alturas diferentes, dichas diferencias incluyen además de las discrepancias entre el nivel medio del mar de referencia individual, los errores sistemáticos de la nivelación geométrica.
  - En general, la nivelación geométrica utilizada para el establecimiento de las redes verticales o **no ha sido corregida** por efectos del campo de gravedad, o ha sido corregida con **diferentes reducciones** (ortométricas). Esto genera incertidumbres hasta de **1,20 m** en las alturas utilizadas actualmente.
  - Las redes verticales han sido medidas por tramos en **diferentes épocas** y en su procesamiento no se ha tenido en cuenta el **cambio de las alturas** a través del **tiempo**. Así, los movimientos verticales, que pueden alcanzar **varios decímetros**, han sido asumidos como errores de observación.
2. El sistema de referencia geométrico (ITRS/ITRF, **SIRGAS** y sus densificaciones nacionales) es consistente en un orden de **precisión de  $10^{-9}$**
3. Los sistemas de **alturas** actuales sólo alcanzan precisiones en el orden  **$10^{-6}$**

# Principales desventajas de los sistemas de alturas actuales

1. **No satisfacen** la ecuación  $h = H + N$ , que relaciona las alturas elipsoidales ( $h$ ) con las alturas físicas ( $H$ , ortométricas o normales) y la superficie de referencia correspondiente ( $N$ , el geoide o el cuasigeoide). Es decir, **no permiten la obtención de alturas físicas a partir de posicionamiento GNSS y modelos geoidales**.
  2. **No** permiten el **intercambio de información** en proyectos supranacionales, pues no son compatibles sino con ellas mismas.
  3. **No** soportan ni la **unicidad** ni la **precisión** requerida ( $\sim 50$  cm) en proyectos de ingeniería, navegación, infraestructuras de datos espaciales, etc.
- Los sistemas de alturas existentes en América Latina resultan **obsoletos** ante la precisión ofrecida por las técnicas geodésicas modernas, especialmente las apoyadas en el posicionamiento y la navegación satelital. Si se quiere **aprovechar al máximo** este tipo de tecnologías en nuestros países, es necesario **modernizar** nuestros sistemas de alturas de manera similar como se ha hecho con el sistema geocéntrico de referencia **SIRGAS**.

# Solución: Sistema vertical de referencia unificado y global

1. Las coordenadas del nuevo sistema vertical deben ser **alturas físicas propiamente dichas**, es decir, diferencias de nivel reducidas por efectos del campo de gravedad.
2. Las redes verticales (números geopotenciales) de los países latinoamericanos deben referirse a **una sola** superficie de referencia (valor  $W_0$ ). Dicha superficie de referencia debe ser de carácter **global** (válida para todos los países del mundo).
3. El marco de referencia vertical (puntos fundamentales de las redes de nivelación, incluyendo los mareógrafos de referencia) deben estar **vinculados a SIRGAS**.
4. El modelo **geoidal** debe ser de **alta resolución** (precisión al cm en longitudes de onda corta derivadas de gravimetría terrestre) y de carácter **global** (longitudes de onda larga derivadas de gravimetría satelital).
5. Todas las alturas involucradas (elipsoidales  $h$ , físicas  $H$  y geoidales  $N$ ) deben referirse a **una** misma **época** y su **variación con el tiempo** debe conocerse precisamente.

Satisface, en teoría y **práctica** la relación:  $H = h - N$

# Importancia de satisfacer $h = H + N$

- Las técnicas actuales de posicionamiento proporcionan la altura geométrica  $h$  con altas precisiones, rapidez y bajos costos. Infortunadamente, estas alturas no son 'utilizables' en la práctica, ya que no dependen del campo de gravedad. Por tanto, las alturas físicas  $H$  deben continuar en uso.
- Las alturas físicas  $H$  se obtienen, tradicionalmente, mediante nivelación geométrica (+ gravimetría), también son de alta precisión, más su determinación es dispendiosa y altamente costosa. El uso adecuado de  $H = h - N$  resuelve estos inconvenientes.
- La información geoespacial generada hasta finales del siglo pasado está asociada a  $H$ , de allí, su vigencia se mantiene con respecto a las tecnologías modernas si éstas se relacionan adecuadamente con  $h$  a través de  $H = h - N$ .

# Importancia de satisfacer $h = H + N$

- La combinación de  $h$  y  $H$  a través de  $H = h - N$  permite el aprovechamiento máximo de las tecnologías modernas, si esta relación no es satisfecha mediante un nuevo sistema vertical de referencia, es necesario que  $H$  siga siendo obtenida por los métodos clásicos (nivelación geométrica).
- El éxito de iniciativas y proyectos de carácter supraregional (como GGOS, Global Map, CP-IDEA, GSDI, ...) se garantiza exclusivamente si estos se apoyan en un sistema vertical unificado para todo el mundo (de forma similar al sistema tridimensional **ITRF** o **SIRGAS**), de lo contrario no habrá consistencia en la variable vertical de los países involucrados.
- Desde el punto de vista práctico,  $H = h - N$  favorece principalmente la reducción de costos y tiempo en proyectos de posicionamiento y navegación apoyados en tecnología satelital (cartografía, infraestructuras de datos espaciales, proyectos de ingeniería, navegación civil y militar, etc.)

# Importancia de satisfacer $h = H + N$

- La aplicación directa de la relación  $H = h - N$  no es posible con los sistemas de alturas existentes. La definición y adopción de un sistema de referencia global unificado **no es una alternativa, es una necesidad**.
- Hasta tanto la relación  $H = h - N$  no sea satisfecha con una precisión de  **$\sim 1 \text{ mm}$** , es necesario hacer levantamientos de nivelación óptica (spirit levelling). Para aplicaciones de órdenes inferiores ( **$\sim 10 \text{ cm}$** ) puede utilizarse transitoriamente  $\Delta H = \Delta h - \Delta N$ .
- Un sistema de referencia vertical moderno se apoya en alturas **elipsoidales** (h), en alturas **físicas** (H) y en sus superficies de referencia correspondientes (**elipsoide** y **geoide**). Un sistema de referencia vertical moderno **no es solo geoide!** El geoide simplemente es la superficie de referencia para las alturas físicas, y si las **alturas físicas** y el **geoide** no son tan **modernos** como las alturas **elipsoidales**, **no** es posible su **combinación**.

# Cómo hacerlo?

1. Determinación de **números geopotenciales** a partir de las mediciones realizadas para las redes verticales (nivelación geométrica) existentes.
2. Adopción de un valor de referencia  $W_0$  (el que recomienda la Asociación Internacional de Geodesia, así se garantiza su oficialidad a nivel global).
3. Ajuste **continental** de las redes de nivelación de primer orden.
4. Transformación de los números geopotenciales en **alturas físicas**.
5. Vinculación del marco vertical de referencia a **SIRGAS** (h).
6. Cálculo **unificado** (continental) del **geoide** asociado al nivel  $W_0$  adoptado anteriormente.
7. Combinación de las **alturas físicas** [5], **posicionamiento GNSS** [6] y el **modelo geoidal** [7] (iterativamente).
8. Observación a través del tiempo de las **variaciones verticales** del marco de referencia (red de estaciones GNSS de funcionamiento continuo).

# Tareas específicas para México, América Central y el Caribe

1. Definición de un **marco (red) de referencia vertical** para cada país, dicho marco de referencia debe incluir: **maréógrafos de referencia** y otros de interés en el país, los **nodos de la red vertical** de primer orden, **estaciones SIRGAS** (monumentos o de funcionamiento continuo) y estaciones en la zonas fronterizas que permitan la **conexión de las redes verticales** de primer orden entre países vecinos.
2. Las estaciones del marco de referencia vertical deben referirse a **SIRGAS** (posicionamiento GNSS) y deben disponer de **números geopotenciales** conocidos (nivelación geométrica + reducciones de gravedad).
3. Las mediciones correspondientes a las redes verticales de primer orden deben estar en **formato digital**.
4. Los datos **gravimétricos** disponibles en cada país deben ser depurados y puestos a disposición, no solo para el cálculo de **números geopotenciales**, sino también para el **cálculo continental del geoide**.

# Tareas específicas para México, América Central y el Caribe

5. Esta información debe ponerse a **disposición del SIRGAS-GTIII** para que se adelante el **ajuste continental** de las redes de nivelación. La información requerida es:
- nombre de los puntos nivelados consecutivamente
  - diferencia de nivel medida entre ellos
  - distancia entre ellos
  - año de nivelación
  - latitud y longitud para cada uno de ellos
  - valor de gravedad (observado o interpolado) para cada uno de ellos.

# Comentarios finales

1. Las tareas aquí planteadas no son fáciles, pero **deben iniciarse**. En el caso concreto de **América del Sur**, estas actividades fueron discutidas por primera vez en un taller de trabajo llevado a cabo en Santiago de Chile en **agosto de 1998**; hasta hoy (**noviembre de 2006!**), solamente **Brasil, Chile y Colombia** han hecho entregas parciales de la información requerida. En noviembre de 2005, durante la reunión SIRGAS llevada a cabo en Caracas, se definió como límite máximo para la entrega de esta información el mes de diciembre de 2005 y aunque se elevaron las solicitudes correspondientes, los demás países no han cumplido este compromiso.
2. Las condiciones en **América Central** y el **Caribe** son diferentes, pues los países son más pequeños y seguramente es **más fácil** revisar la información requerida. Sin embargo, existen problemas para la **conexión física** entre las redes verticales de los países ubicados en **islas** y entre **Panamá y Colombia**. Éstos deberán analizarse en el momento adecuado.
3. Lamentablemente, el SIRGAS-GTIII no pudo hacer la presencia debida en esta reunión, pero estamos a su disposición para lo que estimen conveniente:

**Laura Sánchez, e-mail: [sanchez@dgfi.badw.de](mailto:sanchez@dgfi.badw.de)**

**Gracias!!!**