

## **Determinación del geoide en Venezuela mediante la colocación de cuadrados mínimos.**

*Hoyer M., Wildermann E., Acuña G., Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, Universidad del Zulia.  
Hernández J., Nahmens A., Velandia J., Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.*

### **Resumen**

Para el cálculo del geoide en Venezuela fue utilizado el método de colocación por mínimos cuadrados a partir de mediciones heterogéneas provenientes de diferentes fuentes. El proyecto lo realizan en conjunto el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de La Universidad del Zulia (LGFS-LUZ) y el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), contando además con información suministrada por varios organismos nacionales e internacionales.

En etapas iniciales del proyecto fue necesario desarrollar un modelo digital del terreno, se ha recolectado y seleccionado toda la información gravimétrica disponible; se han planificado, ejecutado y procesado mediciones GPS sobre vértices de nivelación (BM); anomalías gravimétricas a partir de altimetría satelital serán utilizadas posteriormente en zonas marinas del norte del país.

Como producto principal se obtuvo un geoide gravimétrico a partir de anomalías de gravedad, del modelo geopotencial EGM96 y modelos digitales del terreno, posteriormente se incorporó la información de 177 estaciones GPS, uniendo los bloques de un grado por un grado de cada uno de los dos productos antes mencionados (gravimetría y GPS). Tanto el cálculo gravimétrico como la última combinación se efectuó con el sistema GRAVSOFIT.

Como resultado se tiene un geoide para todo el territorio venezolano y parte del Mar Caribe, comprendido desde 1° de latitud en el sur hasta los 16° de latitud norte, y 286° hasta 300° grados de longitud este. Las diferencias entre el EGM96 y el geoide gravimétrico son de  $\pm 0.5$  m, mientras que al comparar el nuevo producto combinado con el geoide gravimétrico las diferencias se encuentran en el orden de  $\pm 0.35$  m.

### **Summary**

A combined geoid has been calculated for Venezuela. During last years LGFS and IGVSB have done many efforts in collecting and processing of heterogeneous data sources supplied by different national and international agencies.

As principal component of data processing gravity information is used employing remove-restore technique for EGM96 and topographic effects. GPS observations over benchmarks of first order levelling network have been

realized to obtain independent data source for control and combination purposes. Satelitaly altimetry will be incorporated, too, at marine parts of the country.

Starting with a gravimetric geoid from gravity anomalies the collocation software GRAFSOFIT has been used for combination with a set of 177 GPS stations. They permit a control and an optimization of geoid surface determination. Calculations are based on 1° x 1° blocks with accounting for data effects from overlapping zones between blocks.

The resulting combined geoid extends over the country and some part of the Caribbean between 1° to 16° latitude North and 286° to 300° longitude East. Differences to EGM96 amount to  $\pm 50$  cm, with the formerly developed gravimetric geoid they reduce to  $\pm 35$  cm.

### **Introducción**

Debido a la falta de información geoidal existente en Venezuela, el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital y el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar han venido desarrollando en conjunto una metodología de trabajo que tiene como producto final la obtención del geoide con alta exactitud y resolución espacial en nuestro territorio venezolano (Wildermann, et al., 1998). Para ello se han utilizado datos de diferente índole (gravimétricas, modelos globales del geopotencial, mediciones satelitales GPS, altimétricas satelitales y modelos digitales del terreno -DTM-).

Se utilizó el método de la colocación por mínimos cuadrados para la obtención del geoide a través del programa GRAVSOFIT (Tscherning, et al., 1994), combinando anomalías de gravedad y mediciones GPS con el modelo geopotencial EGM96 (Lemoine, et al., 1998), y un modelo digital del terreno.

Se calculó inicialmente un geoide gravimétrico (utilizando la data de anomalías de gravedad) que contempló todo el territorio venezolano y parte del Mar Caribe, el cual al ser comparado con el modelo global EGM96 arrojó diferencias de  $\pm 0.5$  m. Posteriormente se anexó al cálculo la data GPS, obteniendo un geoide que mejora al anterior en aproximadamente  $\pm 0.35$  m, lo cual evidencia el aporte suministrado por la data GPS.

Como paso inmediato se espera utilizar la data gravimétrica proveniente de la altimetría satelital y obtener, aplicando el

## Determinación del geoide en Venezuela

mismo método de la colocación de los cuadrados mínimos, el geoide combinado en el Mar Caribe.

### Mediciones gravimétricas disponibles

Para la determinación gravimétrica del geoide se utilizó una gran cantidad de datos procedentes de distintas fuentes (NIMA, Agustín Codazzi e INTEVEP).

NIMA: Es una base de datos con 5.083 registros de valores de gravedad de varios proyectos, entre las latitudes 09° - 19° y longitudes 280° - 309°.

CODAZZI: El LGFS obtuvo la información gravimétrica de 72.102 puntos en territorio venezolano, del banco de datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia, conteniendo valores de gravedad entre las latitudes 02° - 15° y longitudes 61° - 74°.

INTEVEP: Esta base de datos abarca toda Venezuela, El Caribe, Guyana y parte de Colombia y se extiende desde los 0° hasta los 16° de latitud norte y desde los 55° hasta los 75° de longitud oeste. Está conformada por 123.538 estaciones. Este banco de datos es el resultado de una labor de recopilación, adquisición, recuperación y mantenimiento de PDVSA por más de 15 años, y constantemente se está depurando y actualizando.

### Organización y depuración de la data gravimétrica

Debido a que los datos gravimétricos provenientes de las diferentes bases de datos están conformados independientemente en un solo bloque, se tuvo que dividir dicha data en bloques de 1° x 1°, tamaño compatible con el formato de los modelos digitales del terreno (DTM) generados en el LGFS.

En vista de la heterogeneidad de los datos (recopilación proveniente de diversas fuentes) existe duplicidad de información en las distintas bases de datos.

Para la detección y depuración de estaciones coincidentes o muy cercanas, fue necesario tomar en consideración algunos criterios al momento de decidir la eliminación parcial de datos, así como también para unificar y complementar data entre bases de datos diferentes, para ello se elaboró un programa capaz de verificar la composición interna de la data dentro de un área circular cuyo centro es establecido en cada una de las estaciones que conforman el bloque de 1° x 1°. El programa también posibilita la búsqueda de bloques provenientes de base de datos distintas, con la finalidad de visualizar la duplicidad de información entre ambas.

Para tener una visión más clara del proceso empleado en la depuración de data gravimétrica, se presenta a continuación

la metodología empleada:

1. Se ejecuta el programa para cada uno de los bloques que conforman la base de datos, inicialmente con un radio (r) de 30 m y luego con un radio de 100 m.
2. Se elimina la duplicidad absoluta (puntos con coordenadas y gravedad iguales).
3. En caso de tener coordenadas idénticas y valores diferentes de gravedad se promedian dichos valores. De esta forma queda un registro con un valor de gravedad medio. Si la diferencia de gravedad excede los 10 mgal se eliminan los registros involucrados.
4. Si se tienen varios puntos alrededor de un registro se promedia la posición y la gravedad, en particular en el caso de un radio de búsqueda de 30 m.
5. Por intermedio del sistema CAD se efectúa una revisión gráfica del área seleccionada para detectar algunos casos especiales.
6. Se ejecuta nuevamente el programa, primero con r = 30 m. y luego con r = 100 m., para asegurar que la data haya sido depurada totalmente.
7. Posteriormente a la depuración de cada uno de los bloques que integran la base de datos, se repiten los pasos para bloques provenientes de una base de datos distintas, con la finalidad de detectar registros comunes y eliminarlos definitivamente, unificando y complementando toda la data.

Por medio de este proceso se sometió la data gravimétrica a un proceso de evaluación estricto, con la finalidad de obtener anomalías de aire libre, las cuales posteriormente son utilizadas para el cálculo geoidal.

### Modelo digital del terreno

En el ámbito del proyecto se construyó un modelo digital del terreno requerido para las correcciones pertinentes en los cálculos Geoidales. Se digitalizaron 331 cartas escala 1:100.000, que cubren el territorio venezolano, con una resolución cada 2 Km, posteriormente se conformaron 73 bloques de 1° x 1°, los cuales en adelante llamaremos DTM.

Para establecer la confiabilidad de los mismos se realizaron comparaciones con modelos de alturas de otras fuentes, y con puntos BM, para lo cual se establecieron rangos de tolerancias, siendo estos los siguientes:

Diferencias en áreas montañosas	< 200 m.
Diferencias en áreas planas o semi planas	< 50 m.

En total se compararon 7 zonas que abarcan la diversidad topográfica que caracteriza a Venezuela: la zona de los Andes, Lago de Maracaibo, Litoral Central (Caracas), Sucre, Monagas, Anzoátegui y Guárico.

Para poder llegar a una conclusión definitiva sobre la

## Determinación del geoide en Venezuela

calidad del proceso de digitalización, fueron graficados en total 68 DTM, comparando un total de 6837 valores de alturas, de los cuales 6005, es decir aproximadamente el 90 %, se encuentran dentro del rango de tolerancia, según los criterios mencionados.

Las comparaciones realizadas con las estaciones BM confirmaron de forma clara la calidad de los modelos digitales, ya que las diferencias entre ambos en ningún caso exceden las tolerancias establecidas.

### Modelo global ETOPO5

El modelo global ETOPO5 (NOAA/NGDC, 1985) contiene información en celdas de 5' x 5' en latitud y longitud. Este modelo se utilizó para completar la información de altura en los DTM, en aquellas partes del territorio nacional donde no existen aún cartas escala 1:100.000.

Como los datos globales ETOPO5 presentan una estructura muy particular se tuvieron que crear programas para la transformación y ordenamiento del formato, compatibles con los modelos del LGFS. Finalmente se elaboraron 103 DTM a partir del ETOPO5, que conjuntamente con los formados previamente suman 176 DTM, los cuales suministran información de altura sobre toda la región venezolana.

### Mediciones GPS

Se ejecutaron tres campañas de mediciones GPS sobre la mayor cantidad posible de estaciones de nivelación BM, la distribución de estos puntos GPS puede verse en la figura 1 (Hoyer, et al., 2001).

El procesamiento y análisis de las mediciones GPS fueron efectuadas con el software científico Bernese (Beutler, et al., 2000). Este software fue desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (Suiza), con propósitos de investigación y para instituciones profesionales interesadas en obtener altas exactitudes.

Cada campaña se procesó por separado, midiéndose puntos comunes entre ellas; con la finalidad de efectuar vinculaciones y comparaciones.

La primera de estas campañas fue un perfil GPS alrededor del Lago de Maracaibo, el cual se llevó a cabo durante el período del 01 al 18 de Noviembre de 1993. Para la ejecución de las mediciones GPS se utilizaron 8 receptores marca Trimble modelo 4000SST, con los cuales se lograron ocupar un total de 43 estaciones, distanciadas entre sí unos 20 km. aproximadamente, se realizaron tres sesiones diarias de 2 horas cada una, se utilizó una tasa de captura de datos de 15 segundos y un ángulo de elevación de 10° sobre el horizonte. La extensión total del perfil

alcanza aproximadamente 1000 Km.

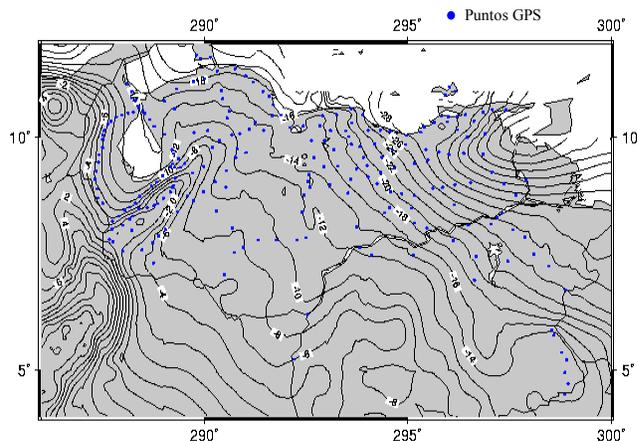


Fig. 1: Distribución de puntos GPS

El procesamiento de estas primeras mediciones se realizó con la versión 3.4 del Bernese, en total fueron procesadas 382.055 observaciones de doble frecuencia. La exactitud promedio de los resultados obtenidos en posición es de  $\pm 0.4$  cm y  $\pm 3.8$  cm en altura.

La segunda campaña abarca toda la parte occidental de Venezuela (Geoide GPS Occidente) la cual tuvo un periodo de observación de 16 días, comprendidos desde el 30 de Julio hasta el 14 de Agosto de 1998.

Se utilizaron en total 6 receptores de doble frecuencia, 5 instrumentos marca ASHTECH y un receptor LEICA ubicado en Maracaibo, el cual forma parte de la red IGS (Servicio GPS Internacional). Se midieron un total de 80 estaciones distanciadas entre sí unos 50 Km. aproximadamente, cubriendo los siguientes estados: Apure, Carabobo, Falcón, Mérida, Táchira, Trujillo, Barinas, Portuguesa, Lara, Cojedes, Yaracuy y Aragua.

En esta campaña se realizaron dos sesiones por día de cuatro horas cada una, siendo la rata de captura de datos cada 15 segundos y una máscara de elevación de 10°.

Las mediciones GPS fueron procesadas y analizadas con el software científico Bernese versión 4.0, el cálculo consideró la combinación de 855.329 observaciones de doble diferencia de fase correspondiente a 89 líneas bases para resolver 417 incógnitas.

La tercera campaña cubrió todo el oriente del país, se efectuó en un período de observación de 11 días, comprendidos desde el 18 al 28 de Mayo de 1999. Fueron utilizados 10 instrumentos marca ASHTECH y el receptor LEICA de la estación IGS ubicada en Maracaibo. En total

## Determinación del geode en Venezuela

se midieron 133 estaciones, separadas entre sí 50 km. aproximadamente.

Diariamente se efectuaron 2 sesiones de medición de cuatro horas cada una, con una rata de captura de 15 segundos y una máscara de elevación de 10°.

Se emplearon un total de 649.658 mediciones de diferencias de fase de las portadoras correspondientes a 136 líneas bases, para resolver un total de 2969 parámetros incógnitas, provenientes de la estimación de coordenadas de las estaciones involucradas y los correspondientes parámetros troposféricos.

Los datos de las mediciones GPS, efectuadas durante esta campaña fueron procesados con el software científico Bernese versión 4.0 y 4.2.

### Ondulaciones GPS

Para el cálculo de las ondulaciones geoidales GPS en cada una de las estaciones medidas en el occidente venezolano era necesario obtener el valor de la altura ortométrica, por lo tanto el IGVS fue el ente encargado de suministrar las descripciones correspondientes 80 en total distribuidas en 12 estados del país.

Para las mediciones GPS realizadas en el oriente del país se recibieron un total de 133 descripciones de puntos BM o excéntricas, en 14 estados del país.

Para el cálculo de la ondulación a partir de las mediciones GPS sobre puntos de nivelación se utilizó la conocida fórmula:

$$N_{GPS} = h_{GPS} - H_{NIV}$$

Con las alturas elipsoidales (h) obtenidas por GPS y las alturas conocidas por nivelación, asumiéndolas como ortométricas (H), se calcularon las ondulaciones GPS ( $N_{GPS}$ ), (Torge, 2001).

### Predicciones de alturas geoidales

Para la predicción de alturas geoidales a partir de observaciones gravimétricas se dispuso del paquete de programas GRAVSOFIT, el cual es un sistema que modela el campo de gravedad geodésico y cuyo uso específico es la determinación de la función de covarianza empírica y su modelado analítico para el cálculo del geode usando la colocación por mínimos cuadrados.

El conjunto de programas GRAVSOFIT esta desarrollado en Fortran y consta entre otros de los siguientes programas: GEOCOL, EMPCOV, TC, TCGRID, COVFIT, SELECT y GEOIP.

Para poder realizar la predicción de las alturas geoidales a través de la data gravimétrica y modelos digitales del terreno fue necesario elaborar formatos comunes entre bases de datos, para esto se han realizado programas de transformación de formatos de entrada y salida de datos, y programas para la densificación y ordenamiento de los mismos.

Todas las coordenadas de los datos gravimétricos se transformaron del Datum La Canoa Hayford al Datum global GRS80.

La dificultad más grande en el cálculo de las alturas geoidales con el paquete GRAVSOFIT se encuentra en el modelaje de las funciones de covarianzas empíricas y analíticas de los datos, sobre todo cuando los datos no tienen una buena distribución espacial, caso éste muy particular en el territorio venezolano.

Con la finalidad de agilizar el proceso del cálculo geoidal, reducir posibilidades de error y realizar comparaciones, se dividió el área de trabajo en 23 bloques, los cuales conforman la denominada zona efectiva.

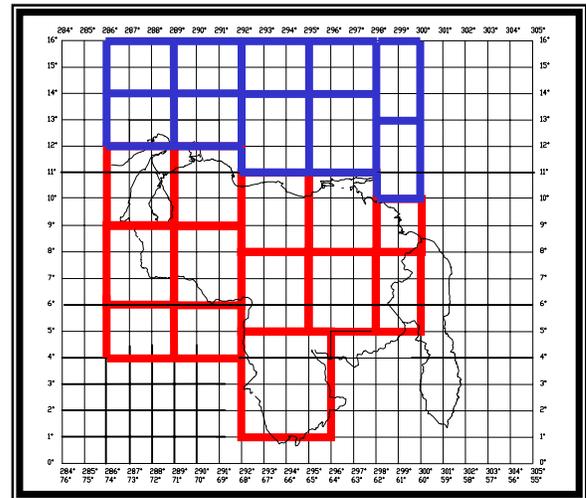


Fig. 2: Zona Efectiva

Para cada uno de los bloques identificados en la figura 2, fue calculado el geode gravimétrico, utilizando la metodología mostrada en la figura 3, llevada a cabo por intermedio del sistema GRAVSOFIT.

El geode gravimétrico obtenido es ilustrado en la figura 4, la data geoidal esta disponible con una resolución cada 1 minuto y comprende toda la zona efectiva.

## Determinación del geoides en Venezuela

### Cálculo del geoides combinado (gravimétrico y GPS)

Se procedió primero a fusionar la data GPS (unir todas las campañas), para obtener un archivo con toda la información ( $N^\circ$ , lat, lon, alt. H,  $N_{GPS}$ ), se organizó nuevamente la data gravimétrica y se verificaron los valores de covarianzas para cada bloque.

Con la finalidad de garantizar el uso de las ondulaciones obtenidas mediante GPS en el cálculo del geoides combinado, se estableció controlar previamente dichas ondulaciones, comparando las mismas con ondulaciones obtenidas con el modelo global del geoides EGM96.

Se utilizaron inicialmente un total de 234 puntos GPS, de los cuales se eliminaron 57 estaciones por presentar diferencias muy altas con respecto al EGM96, resultando un total de 177 estaciones validadas para el cálculo geoidal.

Una vez obtenidas las ondulaciones geoidales a partir de datos gravimétricos y GPS independientemente, se procedió a realizar la combinación de ambos geoides utilizando nuevamente el conjunto de programas GRAVSOFIT.

Para el cálculo del geoides combinado se realizaron pruebas que involucran la data gravimétrica y GPS para determinar los parámetros respectivos en el cálculo, analizando los resultados obtenidos.

Con la finalidad de optimizar el proceso de cálculo se utilizó una metodología similar a la del cálculo del geoides gravimétrico, ver figura 3.

De los 110 bloques de  $1^\circ \times 1^\circ$  que cubren la zona continental de Venezuela, sólo 55 de estos contienen data GPS, se limitó el cálculo combinado a ellos.

Después se fusionaron éstos con los 55 restantes (información gravimétrica únicamente) para completar los 110 bloques que forman la base de la figura N° 5

Se calcularon las diferencias entre el geoides gravimétrico y el combinado (GPS y gravimetría), las mismas oscilan entre los  $-1.0$  m y  $+1.5$  m, predominando las variaciones entre los  $-0.35$  y  $+0.35$  m.

### Conclusiones

El trabajo conjunto que se ha venido realizando desde hace varios años entre el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de La Universidad del Zulia ha generado la obtención de la primera versión del geoides venezolano.

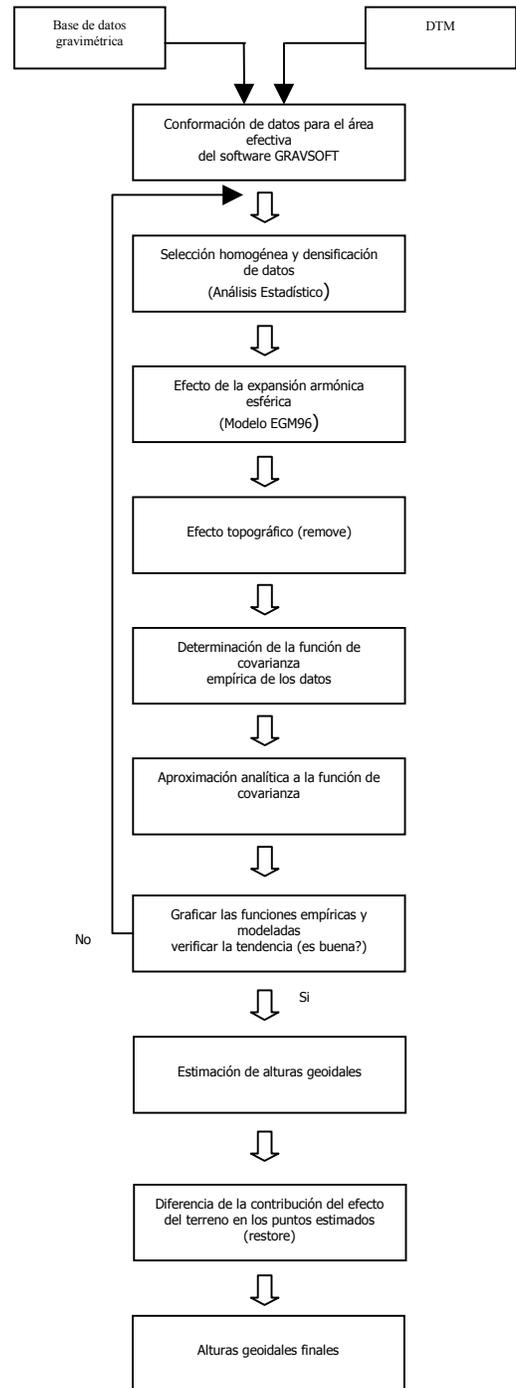


Figura 3: Cálculo de las alturas geoidales con el programa GRAVSOFIT.

## Determinación del geoide en Venezuela

Inicialmente se obtuvo un geoide gravimétrico que se diferencia del modelo geopotencial EGM96 en aproximadamente  $\pm 50$  cm, posteriormente se calculó otro geoide adicionando la data de 177 estaciones GPS. Se puede concluir que el aporte generado por la data GPS sobre este nuevo geoide esta en el orden de  $\pm 35$  cm aproximadamente.

Actualmente se combina el geoide obtenido con altimetría satelital en el Mar Caribe.

### Bibliografía

G. Beutler, E. Brockmann, R. Dach, P. Fridez, W. Gurtner, U. Hugentobler, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer, R. Weber, August 2000 "Documentation of the Bernese GPS software Versión 4.2 DRAFT". Astronomical Institute University of Berne.

Hoyer M., Wildermann E., Acuña G., López M., Gil C., Hernández J., 2001. "Geoid Undulations using GPS measurements in Venezuela". IAG

Lemoine F., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R., 1998. "The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96", NASA Technical Paper NASA/TP-1998-206861; Goddard Space Flight Center, Greenbelt.

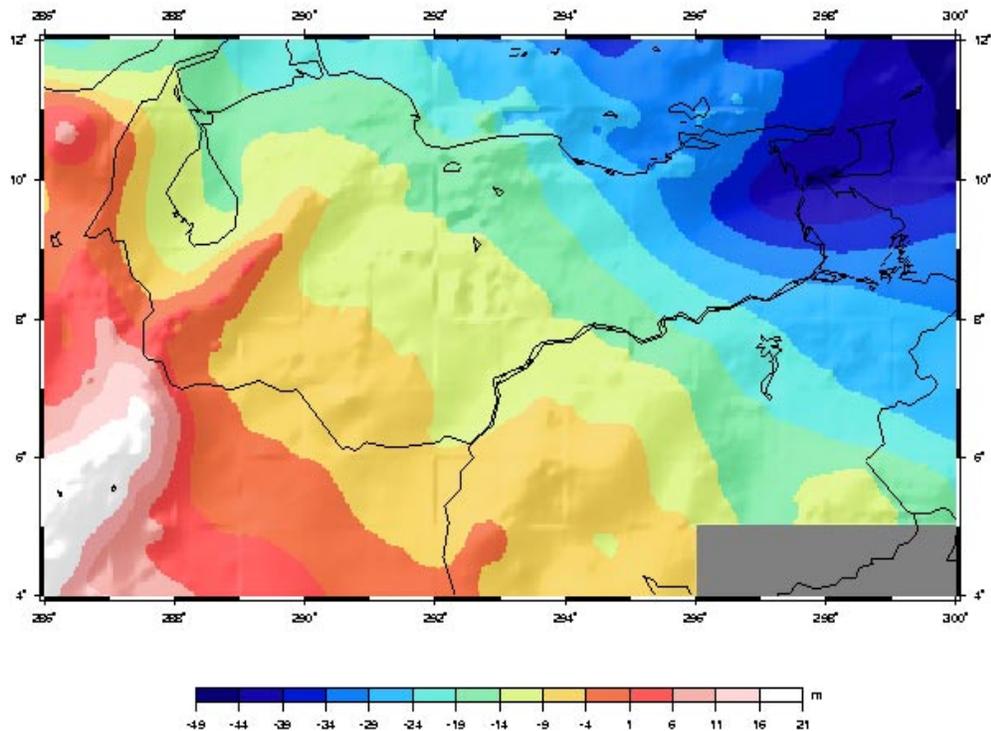
NOAA/NGDC Data Announcement 88-MGG-02. Bathymetry/Topography Data, 1985.

Torge W. Geodesy, 3rd. Edition Walter de Gruyter. Berlin-New York 2001.

Tscherning, C. C., Forsberg R., and Knudsen P., 1994. "GRAVSOFT a System for Geodetic Gravity Field Modelling". Copenhagen. 4<sup>th</sup> edition

Wildermann E., Hoyer M., Acuña G., 1998. "Towards a regional geoid determination in western Venezuela," Geodesy on the Move, International Association of Geodesy Symposia. Volume 119, Springer Verlag.

Agradecimiento: El IGVSB y la EIG de LUZ agradecen la colaboración recibida por parte de las instituciones y personalidades que aportaron sus esfuerzos para la obtención de la información utilizada en los cálculos aquí presentados y para la ejecución de las mediciones de campo GPS. De manera especial se desea dejar constancia de la valiosa colaboración recibida por parte de los estudiantes colaboradores de las actividades de investigación del LGFS en cada una de las etapas del proyecto.



## Determinación del geoide en Venezuela

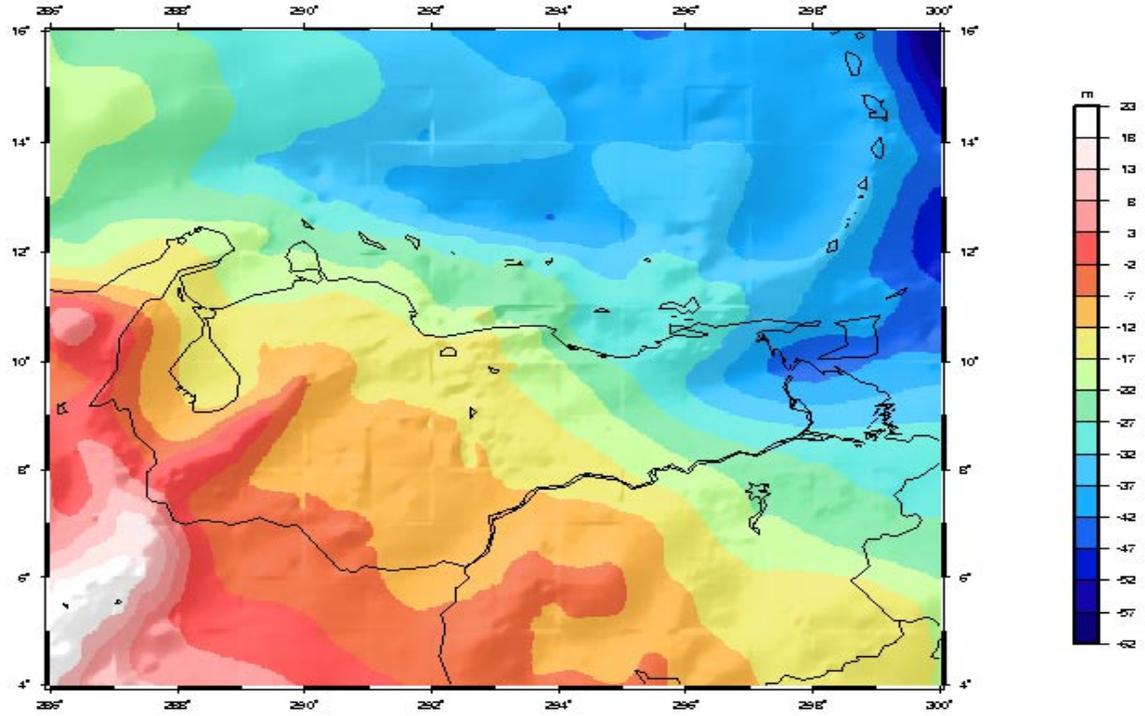


Figura N° 5: Geoide derivado de la colocación