

Metodología para la determinación de ondulaciones del geoides con datos geodésicos heterogéneos para Venezuela.

Daniel Bujana, PDVSA Exploración.

Víctor Guevara, Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura - Universidad Central de Venezuela.

Douglas Bravo, Ministerio de Energía y Minas.

Resumen

El trabajo presenta una metodología para determinar un modelo de ondulaciones geoidales utilizando datos geodésicos heterogéneos. La metodología aplicada combina la Técnica Remove – Restore con Interpolación, permitiendo generar un modelo regional de ondulaciones geoidales. Para evaluar las capacidades de la técnica utilizada se desarrolló un plan piloto en la región nororiental de Venezuela. Como resultado se propone un Modelo Geoidal Regional (MGR), definido a partir de la combinación de información global con efectos locales.

Summary

The paper presents a methodology to determine a model of geoid undulations using heterogeneous geodetic data. The applied methodology combines the Remove - Restore Technique with Interpolation, allowing to generate a Regional Geoid Undulations model. To evaluate the capabilities of the used technique, a pilot plan was developed in the northeastern region of Venezuela, among the parallels $7^{\circ}20'$ and 11° N, and the meridians 62° and 68° W, combining mountainous and plain areas. As a result is presented a Regional Geoid Undulations Model, defined starting from the combination of global information with local effects.

Introducción

En el país no se dispone de un Modelo de Ondulaciones Geoidales para efectuar la transformación de alturas geodésicas (h) referidas al elipsoide geocéntrico GRS80 a las alturas ortométricas (H) referidas al geoides (Ver Figura 1), manteniendo la calidad de las alturas obtenidas con GPS, y para lo cual el valor de la Ondulación Geoidal derivada a través de Modelos Geopotenciales Globales (MGG) no es suficiente. Así mismo, la información disponible en el país para la determinación del geoides, proveniente de una sola fuente de datos es insuficiente, por lo tanto, es conveniente el cálculo a partir de la combinación de información geodésica heterogénea.

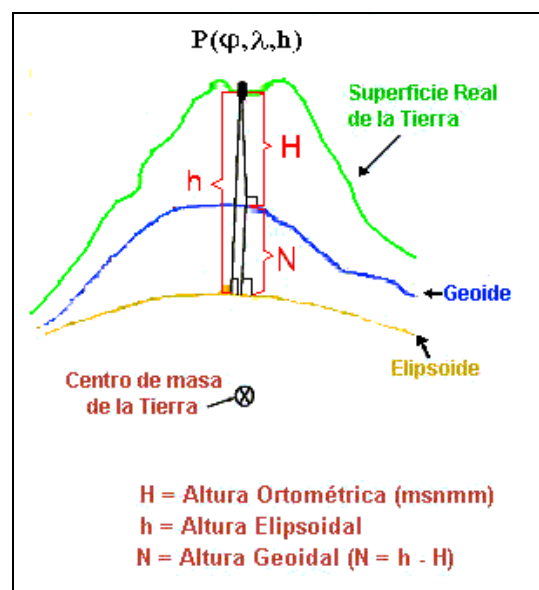


Figura 1. Sistemas de Referencia Altimétricos

El presente trabajo, plantea una metodología para determinar un modelo regional de ondulaciones geoidales utilizando datos geodésicos heterogéneos y procedimientos relativamente sencillos con bajo consumo de recursos, para lo cual se combinó la Técnica Remove – Restore con Interpolación.

La Técnica Remove – Restore permite combinar las características globales del geoides a partir de datos de Modelos Geopotenciales Globales con características regionales del mismo obtenidas a partir de mediciones gravimétricas en la superficie terrestre.

Para evaluar las capacidades del procedimiento utilizado, se desarrolló como plan piloto un Modelo Geoidal Regional en la región nororiental de Venezuela.

La generación de este Modelo Regional se hizo a través de la utilización del Método de Cuadrícula por

interpolación, obteniendo así un archivo de cuadrícula que permite calcular los valores de ondulación de puntos nuevos, utilizando funciones de interpolación.

El modelo fue evaluado correlacionándolo con los valores geométricos de Ondulación Geoidal obtenidos en las estaciones de control GPS sobre BM.

Información disponible para el estudio

Esta investigación estuvo basada en el análisis, sistematización y reinterpretación de datos recolectados de trabajos previos realizados por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) y el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

A partir del análisis espacial de densidad y distribución del conjunto de datos, obedeciendo a la mejor disposición geométrica y a la cantidad de datos heterogéneos, se definió una zona piloto comprendida entre los paralelos 7°20' y 11° N y los meridianos 62° y 68° W que combina áreas montañosas con áreas de llanura.

La red estudiada consta de los siguientes datos:

- 1395 estaciones inerciales de PDVSA levantadas en 1985. Coordenadas en el sistema PSAD 56. Gravedad referida al IGSN71. Precisión: Horizontal: 1:42.000, Vertical: ± 15 cm, Gravedad ± 2 miligal.
- 622 puntos de la Red Gravimétrica Nacional sobre puntos de la Red Nacional de Nivelación (MEM). Coordenadas en el sistema PSAD 56. Gravedad referida al IGSN71. Precisión: Horizontal: $\pm 3''$, Vertical: 1er Orden, Gravedad $\pm 0,01$ miligal
- 66 estaciones GPS (12 pertenecientes a REGVEN y 54 de PDVSA) sobre Bench Marks (BM) de la Red Nacional de Nivelación. Coordenadas referidas al GRS80. Precisión: menor a 5 cm.

Para determinar las características de onda larga se utilizó el Modelo Geopotencial Global EGM96, por ser el que ha sido probado como el más apropiado para Venezuela.

Para dar uniformidad a la data gravimétrica, se decidió tomar la precisión más baja, asignando precisiones al segundo para las coordenadas elipsoidales y al miligal para las anomalías de gravedad.

La Metodología

Se combinó la Técnica Remove-Restore, para el cálculo de las ondulaciones geoidales corregidas por efectos regionales en las estaciones gravimétricas e inerciales, con el método de Interpolación para generar un Modelo Digital de Elevaciones de cuadrícula de espaciado regular.

Obteniendo como producto una cuadrícula en archivo ASCII. Cabe destacar que se realizó una revisión exhaustiva de los datos en cada una de las etapas de cálculo.

La metodología utilizada se resume como sigue:

1. Recolectar y validar los datos.
2. Seleccionar y adecuar los programas de computación.
3. Calcular, en cada estación de gravedad y en puntos de densificación, la componente geoidal global de la anomalía de gravedad (Δg_{MGG}) y de la ondulación geoidal (N_{MGG}).
4. Calcular, en cada estación de gravedad, las Anomalías de Aire Libre (Δg_{AL}), referidas al Elipsoide de Referencia Oficial (GRS80):

$$C_{AL} = (0,3086 + 0,0021 \cos(2\phi))H - 0,0072 \left(\frac{H}{1000} \right)^2$$

5. Remover (REMOVE) el efecto global de la anomalía de gravedad:

$$d\Delta g = \Delta g_{AL} - \Delta g_{MGG}$$

6. Calcular la incidencia regional en la ondulación en cada estación de gravedad, utilizando la formula de Stokes truncada:

$$dN = \frac{S_0}{\gamma} \times d\Delta g$$

7. Calcular el valor de la Ondulación Geoidal Regional ($N_{\Delta g}$) sumando las dos partes de la ondulación (RESTORE):

$$N_{\Delta g} = N_{MGG} + dN$$

8. Generar la cuadrícula, espaciada cada 10', de valores de Ondulación Geoidal Regional ($N_{\Delta g}$).

El Modelo

Puntos de Control

Como puntos de control para calibrar el modelo, se seleccionaron un conjunto de 41 estaciones GPS/BM disponibles en la zona piloto, que poseen mediciones gravimétricas o inerciales dentro de un radio de 1.500 metros, y con una diferencia de altura menor a 15 metros. El promedio de las distancias tomadas fue de 730 m y de las diferencias de altura de 7,17 m.

Entre las estaciones seleccionadas se encuentran SIPA, TUCUPITA, JUNQUITO, AJGD, A144 y B167, que no

cumplían con estas restricciones pero cuya inclusión en el sistema de calibración era necesaria. Debido a que se encuentran en ubicaciones críticas donde son necesarios y no existen otros que cumplan con las condiciones.

Se tomaron estaciones con distancias máximas de 2.460 m y diferencias de alturas de 114,78 m, que se corresponden a los casos antes mencionados.

Cálculo de la componente global de las ondulaciones geoidales y las anomalías de la gravedad a partir del MGG EGM96

Para el cálculo de la componente global de las Ondulaciones Geoidales se seleccionó el programa Geopot97, desarrollado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), que entre otras funciones relacionadas con MGG calcula la componente global de la ondulación del geoido y de la anomalía de la gravedad. Este software permite escoger el campo normal (elipsoide de referencia), el potencial W_0 del geoido, la velocidad angular ω y el sistema de marea permanente.

Se calcularon las componentes globales de las Ondulaciones Geoidales y de las Anomalías de Gravedad para cada punto con gravedad observada en Tierra (estaciones gravimétricas e inerciales) en la Zona Piloto.

Para el cálculo de las ondulaciones Geoidales a partir del MGG EGM96 se utilizó la siguiente información:

1. El conjunto de coeficientes, desde grado 2 al grado 360.

2. El valor de la constante de masa-gravedad:

$$GM_T = 398.600.441,5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} *$$

3. El factor de escala ecuatorial:

$$a_T = 6.378.136,3 \text{ m} *$$

4. Como elipsoide de referencia (campo de potencial gravitacional normal) se utilizó el GRS80 (ver sección 2.5.2.2.1).

5. Como valor de potencial del geoido se tomó:

$$W_0 = 62.636.855,8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} **$$

6. Las alturas elipsoidales GPS, el MGG EGM96 y el Sistema de Referencia ITRF94 (al cual está referido REGVEN) se encuentran en el sistema Libre de Marea.

* Valor adoptado por el programa Geopot97 para el EGM96.

** Valor tomado de "Final Report on Testing Accuracy of Geopotential Models EGM01 – EGMX05, EGM96", Working Group Global Geodesy: Satellite Altimetry Applications, 1998.

Mientras tanto, la red de gravedad IGSN71 está en el sistema de Marea Media.

Debido a que los usuarios finales del Modelo de Ondulaciones Geoidales son los usuarios de GPS, que desean transformar las alturas elipsoidales medidas con ese sistema a alturas ortométricas, se decidió tomar una solución más consistente con la práctica. Para ello se hicieron pruebas con el sistema de Marea Media y el sistema Libre de Marea, comparando ambas soluciones con las Ondulaciones obtenidas GPS sobre BM's en 7 puntos REGVEN, tomando entonces el Sistema cuya solución fuera la más cercana a estas mediciones.

Se observó que la diferencia de la N_{EGM96} calculada en ambos sistemas, es constante en una magnitud de 12 cm para estas latitudes. También se observó que las N_{EGM96} en el sistema Libre de Marea, se acercan más a las N_{GPS} (promedio de $-0,04$ m) que las calculadas en el sistema de Marea Media (promedio de $-0,16$ m), aunque la desviación estándar arroje el mismo valor para ambas (0,66m). En consecuencia al presente análisis, se seleccionó el sistema Libre de Marea para hacer los cálculos.

Componente Global de las Ondulaciones Geoidales

Una vez calculada la contribución global de la Ondulación Geoidal, se obtuvo la superficie para la Zona Piloto. (Figura 2)

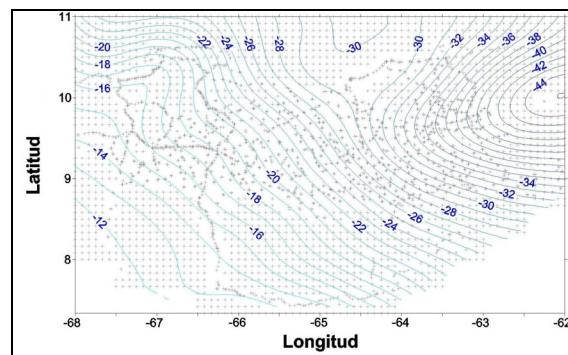


Figura 2. componente global de ONDULACIONES GEODIALES- eGM96.

Componente Global de las Anomalías de Gravedad

El programa Geopot97 ofrece la posibilidad de calcular la anomalía de gravedad de dos maneras, la ecuación fundamental de la geodesia física y la aproximación esférica de la misma (Smith, 1998). Se tomó ésta última por ser compatible con los armónicos esféricos. Sin embargo, para las precisiones deseadas (miligal) ambas se comportan igual.

A continuación se muestra la superficie de la componente global de las anomalías.

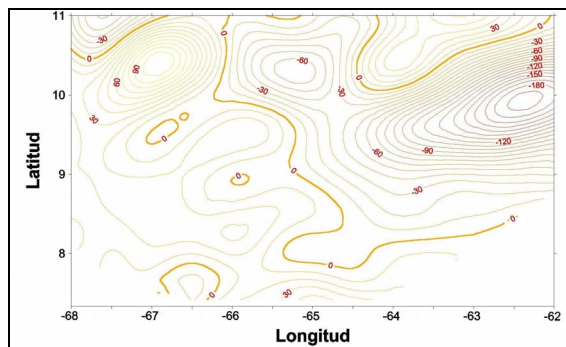


Figura 3. componente global de Anomalías de gravedad

Comparando ambas superficies se puede observar que tienen la misma tendencia. Cabe destacar que la línea de valor de anomalía 0 (cero) no se corresponde con la de ondulación geoidal 0 (cero).

Cálculo de la Componente Regional de la Ondulación Geoidal

Si bien la componente global permite cuantificar la influencia gravitacional de toda la Tierra, su comportamiento es bastante suave, mostrando las longitudes de onda más largas de la señal geoidal, lo cual es insuficiente para representar los rasgos locales que, en realidad, son quienes determinan la amplitud del campo de gravedad terrestre.

De allí, se hace necesaria la adición de una componente geoidal regional, obtenida a partir de la evaluación de las anomalías gravimétricas superficiales a través de la Fórmula de Stokes (Sánchez et. al, 1999), la cual refina las magnitudes de las ondulaciones y considera la influencia gravitacional de rasgos geológicos regionales presentes sobre la superficie.

Para el cálculo de la componente regional de la ondulación del geoide debió prepararse los datos gravimétricos e inerciales adecuadamente. Primero se transformaron sus coordenadas geodésicas latitud y longitud, del sistema de referencia PSAD56 a REGVEN, utilizando el programa PTREGVEN de la Universidad del Zulia. Posteriormente se calcularon las Anomalías de Aire Libre referidas al elipsoide GRS80.

Posteriormente mediante la técnica REMOVE / RESTORE se extrajo el efecto global de la anomalía de gravedad para cada estación.

Al observarse las curvas, se estudia la diferencia que existe entre el modelo global y los valores regionales, notando variaciones desde -80 a 120 mgal. La estación que tiene

mayor diferencia positiva, es VDF14A (10°26'55" N, 67°08'55" O) con 120,708 al noroeste de la zona de estudio, donde la anomalía está influenciada por la altura. Mientras la de mayor valor negativo es B.VISTA (10°19'55" N, 64°18'29" W) con -94.412 mgal al este, ubicada en el tramo oriental de la Cordillera de la Costa. Estas diferencias grandes no solo se presentan en las zonas montañosas, sino también debido a rasgos geológicos, sin la necesidad de que existan elevaciones orográficas, como en caso del sur de la ciudad de Maturín. En la ladera suroeste de la depresión, hacia el Sur de la ciudad de Maturín, se aprecia una pequeña superficie convexa, que tendrá un cambio significativo en la componente regional de la ondulación geoidal en esa zona.

Es importante señalar la predominancia en la zona de estudio de la línea cero, que señala intersecciones de la superficie física corregida regionalmente con la superficie física global. Esto indica que el MGG se ajusta a la superficie corregida, presentando un promedio de las diferencias de anomalía de -4,2 mgal, un promedio de los valores absolutos de 15,4 mgal y una desviación estándar de 22,07 mgal

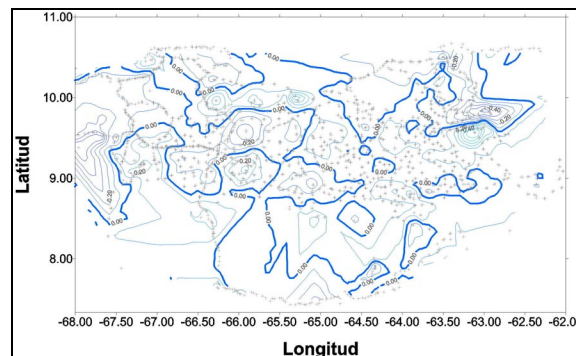


Figura 4. Componente geoidal REGIONAL

Selección de los radios de influencia utilizados en la Integral de Stokes.

El cálculo de la componente geoidal regional, se hizo mediante la aplicación del modelo de Stokes, utilizando la fórmula truncada:

$$dN = \frac{S_0}{\gamma} \times d\Delta g$$

Para calcular la componente geoidal regional, debió establecerse el radio adecuado a ser utilizado. El criterio para la escogencia del mismo se basó en la distancia media aproximada entre las estaciones y en el tipo de topografía. En este sentido se establecieron varias zonas con radios distintos. En las zonas montañosas se utilizaron radios iguales a 3 km, debido a que ésta es la distancia promedio determinada gráficamente entre las estaciones, mientras en las zonas planas análogamente se utilizaron radios iguales a 10 km.

Finalmente quedaron definidas tres zonas, dos montañosas correspondientes a los tramos Central y Oriental de la Cordillera de la Costa y una plana correspondiente al área restante, comprendida por Los Llanos y la depresión de Unare y Delta Amacuro.

Las áreas fueron definidas de forma rectangular (Figura 4), por la facilidad de realizar la búsqueda de los datos en las tablas Excel.

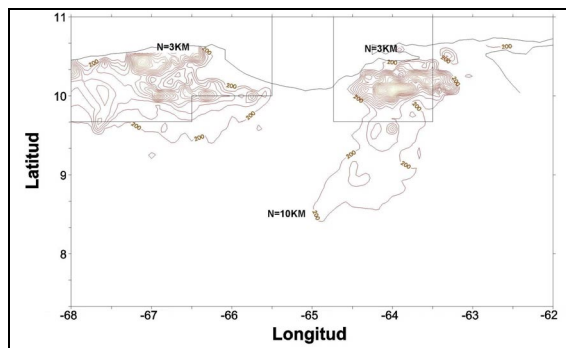


Figura 5. MDT y las zonas definidas para calcular la componente geoidal regional

Ondulación geoidal gravimétrica.

Para obtener el valor de la ondulación geoidal gravimétrica N_{GR} , se sumó la corrección regional a la componente global para cada una de las estaciones. El valor máximo obtenido fue para PEDERNAL con $-44,673$ m y su mínimo en FERNANDO con $-11,739$ m.

Se probaron los radios de influencia escogidos en cada uno de los puntos de Control, para determinar el comportamiento del modelo con dichos radios. El valor de ondulación obtenido por método geométrico se consideró como el valor verdadero de la ondulación, utilizándose como control para calibrar el modelo gravimétrico regional, evaluando así la precisión relativa del mismo.

De las 41 estaciones seleccionadas, 30 mejoran y 9 se alejan con valores por debajo del decímetro y dos con valores superiores al decímetro, representando el 5% de la muestra. El promedio de las diferencias con las ondulaciones GPS, es igual para el EGM y el MRG, con $-0,39$ m. El EGM presenta unos extremos de $1,14$ m y $-2,02$ m de diferencia, mientras el MRG los presenta en $0,95$ m y $-1,71$ m. Las desviaciones estándar para el EGM y el MRG son $0,39$ y $0,31$ respectivamente.

Interpolación para el modelo final (GROV-UCV-2001).

A partir de los valores de Ondulación Geoidal Gravimétrica en las estaciones, se generó un MDE de cuadrícula regular de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, cubriendo parcialmente la

zona entre los $7^{\circ}20'$ y los 11° de latitud Norte y del meridiano 62° Oeste al meridiano 68° Oeste. A dicho modelo final se le dio el nombre de Modelo Geoidal Regional para el Oriente de Venezuela UCV 2001. (GROV-UCV-2001).

Para generar la Cuadrícula, se utilizó el método de Triangulación con Interpolación Lineal, empleando el software Surfer 6.02. Esto permite entregar como producto final, un archivo de MDA que es práctico para realizar interpolaciones inversas a partir del mismo, para obtener los valores de ondulación geoidal en puntos de interés para el usuario que no coincidan con los puntos de la cuadrícula.

Para evaluar esto, se utilizó el software diseñado por la Agencia Cartográfica Australiana (AUSLIG) para la interpolación de los archivos de su modelo geoidal. Este software, denominado WINTER (Windows Interpolation), utiliza el método de interpolación bicúbica a partir de un archivo de MDE de cuadrícula regularmente espaciada, combinándola con interpolación bilineal para puntos cercanos en las fronteras de la base de datos.

Para probar la bondad del proceso de interpolación, se determinó el valor de ondulación geoidal gravimétrica a partir de la cuadrícula con interpolación bicúbica y bilineal, al compararla con los valores de ondulación geoidal gravimétrica de las estaciones utilizadas para generar la cuadrícula. En la tabla 1 se muestran los resultados estadísticos.

Tabla 1. Bondad de la interpolación.

	Res_ N_{M3}	Res_ N_{M2}
Max	0,32	0,32
Min	-0,24	-0,30
Desv. Std.	0,04	0,05

Se observa que la N_{M3} (bicúbica) en general tiene mejores resultados que N_{M2} (bilineal), aunque la magnitud de las diferencias no es significativa para las precisiones del presente modelo.

Existen un total de 25 puntos cuyos residuales exceden los 15 cm, el cual representa un porcentaje de 1,25% del total de la muestra, la mayor cantidad de estos se encuentran al este en la zona del tramo Oriental de la Cordillera de la Costa. Estos puntos representan una parte muy pequeña de la muestra, manteniéndose el 98,75 % de los datos con diferencias inferiores a 15 cm.

Modelo GROV-UCV-2001.

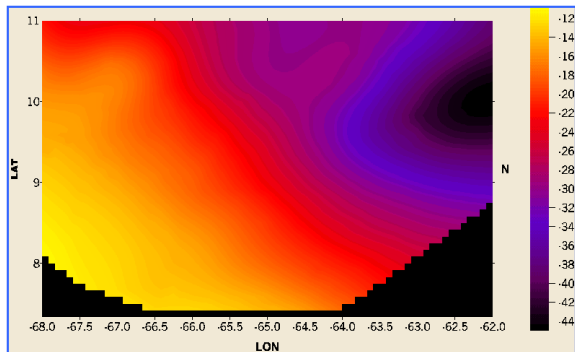


Figura 6. Modelo GROV-UCV 2001.

Precisión Relativa del Modelo GROV-UCV-2001

Se calcularon por interpolación usando el método bilineal y bicúbico las ondulaciones, usando las coordenadas Geodésicas de las 64 estaciones GPS y así determinar la precisión relativa del modelo GROV-UCV-2001. De los 64 puntos de muestra, dos (2) puntos, representando el 3% de la misma, no poseen una buena tendencia comparados con otros vecinos.

Se observó que el modelo mejoró considerablemente, usando el método de interpolación bicúbica, de 0,29m a 0,21m de promedio y en desviación estándar de 0,35m a 0,27m. Al estudiar los valores absolutos de las diferencias obtenidas, se aprecia una tendencia general de comportamiento del modelo alrededor de los valores de N_{GPS} , entre 0,32 a 0,28 m.

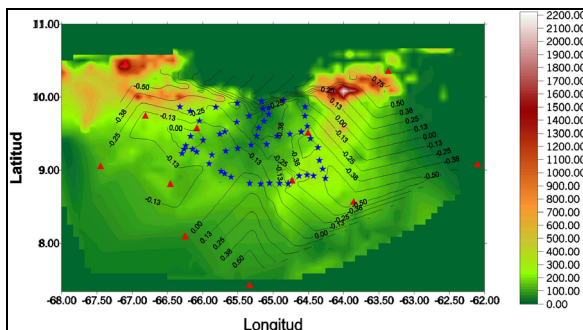


Figura 7. Curvas de precisión relativa del modelo GROV-UCV-2001

En la figura 7 se tienen las curvas de precisión relativa del modelo GROV-UCV-2001, comparadas con el modelo altimétrico de la zona. Existen ciertos rasgos notables en estas curvas. En la zona este, entre La Canoa y la Serranía del Turimiquire y en la zona oeste entre SRIT y el Tramo

Central de la Cordillera de La Costa, se observa una correlación directa entre las diferencias $N_{GROV}-N_{GPS}$ y la topografía. En la zona central, hacia la depresión de Unare, al sur de la Fosa de Cariaco y entre los tramos Oriental y Central de la Cordillera de la Costa, se observa un posible efecto regional. Otros rasgos locales se observan en el punto Picapical y cerca del punto AACO un poco más al nordeste.

Debe resaltarse, que las curvas de correlación son realmente representativas en la zona donde hay buena distribución de estaciones GPS.

Análisis de Perfiles

A continuación se presenta un análisis agregando la información del GROV-UCV-2001 a los perfiles realizados por PDVSA (Rincón, et. al. 1997), comparándolo con las ondulaciones geoidales EGM96 y Geoide Oriente 97 (GPS sobre BM). Estos son 7 perfiles desarrollados sobre circuitos de nivelación existentes en los estados Anzoátegui y Guárico abarcando 1.277 Km., seleccionados de acuerdo con la orientación de los circuitos de nivelación para evaluar el comportamiento en las direcciones Norte – Sur, y Este – Oeste (Ver Figura 8).

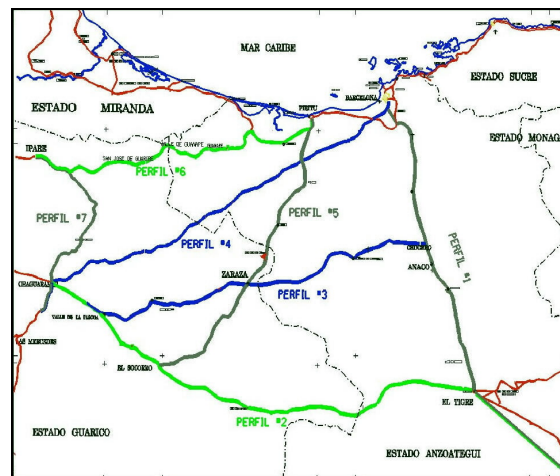


Figura 8. Ubicación de los Perfiles

Se observó una tendencia general a la separación de las curvas de los perfiles de N_{GROV} de las N_{GPS} y N_{EGM} hacia las zonas donde existen alturas mayores a los 150 m. Esto se debe posiblemente a la necesidad de hacer la corrección topográfica a partir de esta altura. A tal efecto es recomendable la realización de la corrección topográfica en las zonas donde se presentan estas elevaciones.

También se observó una separación de las curvas, en sentido inverso, en las cercanías de la Fosa de Cariaco.

Esto puede deberse a la ausencia de masas producida por la fosa.

Modelo GROV-UCV-2001 para el usuario final

Debido a que es importante tener una buena distribución y densificación de puntos, se decidió tomar como producto definitivo para el usuario final, un Modelo Regional limitado a la zona donde se cumple esta condición, permitiendo ofrecer un producto confiable.

La región para el Modelo Definitivo está comprendida entre los paralelos $9^{\circ} 40'$ y 10° N y los meridianos 67° y 63° O, representando un 24,24% del total de la zona de estudio. Para evitar una interpolación bilineal en los extremos del modelo, se extendió la zona en $10'$ en cada uno.

Para la zona del modelo final se dispuso de 1238 estaciones de gravedad (o inerciales), que representan el 62,17% de los puntos usados para el total de la zona de estudio. Se usaron 83 puntos de densificación que se encuentra en los bordes, representando el 6,28 % de los datos usados para la zona.

Se generó la cuadrícula final para esta zona, en un archivo de código ASCII (GROV-UCV-2001.DAT), con el formato de archivo de cuadrícula utilizado por el software WINTER.

En cuanto a la bondad de la interpolación en la zona de Usuario, hay 25 puntos por encima del decímetro que representan el 1,95 % de la muestra y 12 puntos por encima de 0,15 m representado el 0,94% de la muestra y 5 puntos por encima de 0,20 m que representa el 0,39. El promedio de la muestra es 0,00 m, y su desviación estándar es de 0,04m.

Se calcularon las ondulaciones por interpolación bilineal y bicúbica usando las coordenadas Geodésicas de 58 estaciones GPS y así determinar la precisión relativa del modelo GROV-UCV-2001.

Las precisiones relativas del modelo están entre $-0,76\text{m}$ y $0,34\text{m}$, con una desviación estándar de $0,21\text{m}$. El 98% de la muestra se mantiene por debajo de los $\pm 0,30\text{m}$.

Conclusiones y Recomendaciones

- La metodología desarrollada para el logro del objetivo que es generar un Modelo Geoidal Regional, puede considerarse óptima.
- Cada uno de los procedimientos involucrados arrojaron resultados dentro de las precisiones esperadas.
- La metodología en sí, demostró su factibilidad de aplicación con bajos recursos de hardware, ya que pudo efectuarse en ordenadores Pentium 120 Mhz, con 16 Mb

de memoria RAM, mientras otros procesos alternativos podrían requerir el uso de Estaciones de Trabajo.

- Es importante resolver el asunto de los sistemas de marea para futuras investigaciones y aplicaciones. Este problema científico no es solo de índole nacional, sino internacional. Esto contribuiría a establecer un Datum altimétrico global, que consecuentemente llevaría a uniformar las redes de gravedad de todos los países y generar Modelos Geoidales más precisos y consistentes.

- La precisión del Modelo Geoidal depende de las componentes que lo integran:

- El error del MGG introduce el mayor error de longitud de onda larga en la ondulación, el cual no puede ser eliminado por el uso de densos datos de gravedad.

Para que los nuevos MGG mejoren en la zona, deben incluirse nuevos datos gravimétricos en el proceso de elaboración del mismo, en este sentido, se recomienda facilitar los datos gravimétricos nacionales a los organismos internacionales encargados de generar dichos modelos.

- El error en la componente regional de la ondulación depende de la cobertura, densidad y exactitud de los datos locales de la gravedad. Para minimizar y eliminar esos errores de la longitud de onda media se recomienda la densificación datos para Δg .

- Los mayores errores introducidos al generar la cuadrícula a través de la interpolación se producen en las zonas donde hay deficiencia de datos, y en las que hay concentraciones excesivas de los mismos. Es importante la correcta distribución de las estaciones para evitar estos efectos.

- Es importante, además de la calidad de los datos, las técnicas de cálculo y correcciones utilizadas. Para mejorar la precisión del Modelo, deben agregarse correcciones y utilizar procedimientos de cálculos más refinados:

- El uso de la forma truncada de la integral de Stokes arrojó resultados satisfactorios. Para mejorar la precisión en esta fase, se recomienda la evaluación de la integral de Stokes a través de la Transformada Rápida de Fourier.

- El uso de la técnica Remove-Restore hasta la componente regional resultó satisfactoria. Se hace necesaria la adición de la corrección topográfica para obtener las características de onda corta. También se recomienda para aumentar la precisión del modelo, incluir la corrección del primero y segundo problema indirecto.

- El proceso de Cuadrículado a través de Triangulación con Interpolación Lineal para generar la cuadrícula de $5' \times 5'$, presentó resultados satisfactorios con una desviación estándar de $0,04\text{m}$. Esto podría mejorarse utilizando métodos de interpolación de orden mayor.

- La interpolación bicúbica utilizada para la interpolación de los puntos nuevos a partir de la cuadrícula, presentó también resultados satisfactorios.

- Se recomienda publicar Modelos Geoidales de menor precisión al principio e ir aumentando la precisión a medida que se realicen nuevas mediciones y mejoras en los métodos matemáticos.

- En general, la precisión relativa arrojada por la correlación del Modelo GROV-UCV-2001 con el Modelo Geoidal GPS es aceptable.

- Debido a que la tendencia internacional actual es ir hacia un Datum Altimétrico Global, se recomienda la realización de Modelos Geoidales Gravimétricos que mantengan la compatibilidad con el modelo global, de esta manera los modelos regionales desarrollados por países vecinos, estarían referidos a un mismo Datum altimétrico y podrían ser ajustados en conjunto, asegurando la continuidad de la superficie.

Referencias

Pavlis, N.(1997). *Development and Applications of Geopotential Models*. Rio de Janeiro, Brazil: Second International School for the Determination and use of the Geoid.

Torge, W.(1983). *Geodesia*. México: DIANA.

Zakatov, P. (1981). *Curso de Geodesia Superior*. U.R.S.S.: MIR.

MENEVEN (1985) *Posicionamiento Inercial de Puntos Geodésicos Estratégicos: Listado de los Datos Geodésicos Ajustados*. Caracas: Autor.

MENEVEN (1986). *Informe del Levantamiento de Puntos Geodésicos Estratégicos Utilizando el Método de Posicionamiento Inercial*. Puerto La Cruz: Autor.

Acuña, G., Hoyer, M., Wildermann, E. y Hernández, J.(1999). *Avances en el proyecto para la determinación del Geoide en Venezuela*. International Geoid Service Bulletin, N° 9 Special Issue for South America, pp.21-30.

Bursa, M., Radej, K., Kouba, J., True, S., Vatrt, V. y Vojtisková, M. (1997.). *Final Report on Testing Accuracy of Geopotential Models EGMX01-X05, EGM 96*. International Geoid Service Bulletin, N° 7, pp.14-23.

Comité para la determinación del Geoide en Venezuela. (1993). *PROYECTO. El Geoide en Venezuela*. Caracas: SAGECAN.

Hernández, N. (2000). *Evaluación del Earth Gravity Model EGM-96 utilizando La Red Geodésica Venezolana REGVEN*. Caracas: Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, M.A.R.N.R.

Hernández, N., Drewes, H. y Tremel, H. (2000). *La Red Geodésica Venezolana REGVEN*. Caracas: Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, M.A.R.N.R.

Hoyer, M., Acuña, G., Wildermann, E., Royero, G., (s.f.). *La Transformación del Datum Satelital WGS84 al Datum PSAD56 en Venezuela*. 9° Jornadas Científico Técnicas de Ingeniería (pp.331-340).

Rincón, G., y Vargas, K. (1997). *Determinación de Ondulaciones Geoidales en el Oriente del País Utilizando Método Satelital GPS*. III Congreso Venezolano de Geodesia.

Sánchez, L., Martínez, J., y Flórez J. (1999). *Determinación de un Geoide Gravimétrico para Colombia*. International Geoid Service Bulletin, N° 9 Special Issue for South America, pp.87-98.

Subiza Piña, W.H. (1999). *Avances en la Determinación de un Geoide de Precisión para Uruguay*. International Geoid Service Bulletin, N° 9 Special Issue for South America, pp.99-108.

Smith, D. (1998). *There is no such thing "The EGM96 geoid: Subtle points on the use a global geopotential model*. International Geoid Service, Bulletin N 8. (pp. 17-28).

The Defense Mapping Agency DMA (1991). *Department of Defense World Geodetic System 1984, it's Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Fairfax, E.E.U.U.: Autor.

Johnston, G.M. y Featherstone, W.E. *Ausgeoid 98: A new Gravimetric Geoid for Australia*. [On-line]. Disponible en: <http://www.auslig.gov.au>

Kidner, D.,Dorey, M., y Smith, D. *What's the point? Interpolation with Regular Grid DEM*. [On-line]. Disponible en: http://www.geovista.psu.edu/geocomp/geocomp99/Gc99/082/gc_082.htm