



**INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA
DIRECCIÓN GENERAL DE GEOGRAFÍA**

“DATOS INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DEL GGM05”

DIRIGIDO A:

**PÚBLICO INVOLUCRADO EN EL MANEJO DE
INFORMACIÓN GEODÉSICA.**

**POR: ING. RAUL MUÑOZ ABUNDES
LMA. DAVID AVALOS NARANJO**

Marzo de 2006

DATOS INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DEL GGM05.

RESÚMEN

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) desarrolló un nuevo modelo geoidal gravimétrico para la República Mexicana (GGM05), el cual tiene una mayor precisión que su antecesor el GGM04. El refinamiento en la solución se basa principalmente en la incorporación de una mayor cobertura en los valores de gravedad puntual, el uso de un modelo de topodensidad nacional, además de un modelo geopotencial global en coeficientes armónicos esféricos más reciente y a las mejoras teóricas y prácticas del método de elaboración, como el cálculo riguroso de la continuación descendente.

INTRODUCCIÓN

Como parte de las funciones y atribuciones del INEGI, la Dirección General de Geografía (DGG) se fijó como objetivo la elaboración de un modelo geoidal para el área Mexicana, el cual cumpliera los estándares de calidad acordes a los requerimientos que demandan los usuarios en la actualidad, mejorando la precisión de soluciones anteriores, las acciones inmediatas para lograrlo fueron:

- Capacitación al personal involucrado en la determinación del modelo geoidal sobre la técnica Stokes-Helmert y manejo de software científico elaborado para tal propósito, desarrollado por el Departamento de Geodesia y Geomática de la Universidad de New Brunswick en Canadá.
- Acopio y revisión exhaustiva de los datos de gravedad puntual involucrados en el proceso, tanto los del INEGI, como aquellos que fueron facilitados por otras Instituciones como Petróleos Mexicanos (PEMEX) y de Norteamérica la Agencia Nacional de Mapeo e Imágenes (NIMA).
- Acopio de los modelos geopotenciales globales necesarios para los cálculos en la zona lejana y elaboración de un modelo continuo digital de elevaciones para el área Mexicana, con una resolución de 1"x1". El cual es muy necesario en el cálculo de efectos directos e indirectos como la corrección del terreno en la zona cercana.
- Obtención de coordenadas geodésicas medidas con GPS sobre bancos de nivel ajustados a la red NAVD88, necesarios para realizar la evaluación de los resultados.

El lanzamiento de esta solución geoidal y su continuo mejoramiento, pretende aprovechar la determinación de alturas con los sistemas de posicionamiento global por satélite, permitiendo a los usuarios obtener alturas ortométricas a partir de las geodésicas. Pensando en un futuro llegar a complementar la nivelación diferencial de precisión, con el subsiguiente ahorro en costos y tiempo. Además se pretende realizar un refinamiento continuo conforme se detecten áreas de oportunidad o se vayan dando mejoras tanto en el grado de cobertura de información geodésica de referencia como en los procesos, para ir a la par de los requerimientos de los usuarios.

Como valor agregado se tiene el modelo digital de elevaciones continuo para México y los archivos y modelos digitales de los efectos y correcciones que se generan durante el proceso.

MODELOS GEOIDALES EXISTENTES PARA MÉXICO

La actividad gravimétrica en el INEGI comienza desde la década de los 80's, y ha sido influenciada por las condiciones y necesidades predominantes en cada momento, ha pasado por varios proyectos y programas de cooperación con diferentes Instituciones, lo que ha dado como resultado una cantidad de alrededor de 30,000 puntos con valor de gravedad medidos a lo largo y ancho de todo el país. Dentro de uno de esos proyectos se acordó la cooperación con el National Geodetic Survey (NGS) de los Estados Unidos de América, para proporcionarles los valores puntuales gravimétricos como parte de los insumos para determinar un modelo geoidal para nuestro país, resultando el modelo geoidal México97, para su determinación se usaron más de un millón de valores de gravedad terrestre y marina, el método de cálculo utilizado fue el conocido como "remove-restore" y la técnica Transformada rápida de Fourier. El resultado fue una malla de alturas geoidales con espaciamiento de 2'x2' en latitud y longitud, referido al elipsoide del Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80), en el Marco de Referencia Terrestre Internacional 1994 (ITRF94 época 1996.0).

Previo a este modelo geoidal, en el país se utilizaron los siguientes modelos geoidales; el elaborado por la Universidad Estatal de Ohio (OSU91A), y el Modelo de Potencial de la Tierra (EGM96) elaborado conjuntamente por la Agencia Nacional de Mapeo e Imágenes (NIMA), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Universidad Estatal de Ohio, estos modelos en su momento ayudaron en la determinación de alturas geoidales, requeridas en los procesos Institucionales.

Con el uso cada vez más generalizado del sistema de posicionamiento global, y buscando un mayor aprovechamiento de esta técnica, se vio la necesidad de determinar una nueva solución geoidal para el país, la cual estuviera más acorde a los requerimientos actuales. En este contexto se planearon las acciones inmediatas para conseguir este fin. Lo primero fue elegir el método que se adecuara a las condiciones de México, tanto en los insumos existentes como en la solidez teórica, eligiendo determinar un geoide gravimétrico bajo el esquema Stokes-Helmert.

El resultado fue un modelo geoidal submétrico, el cual será refinado hasta llegar a nivel centimétrico. La obtención de la primer solución en el año 2004 permitió ubicar aquellos lugares donde se requería de una mayor cobertura de valores de gravedad puntual, conocer también aquellas zonas que de acuerdo al resultado requieren mayor atención en la validación de los insumos existentes, para definir la influencia de cada uno en la precisión final y decidir cuales de ellos es necesario mejorar o cambiar. Para la versión del 2005, ya fue posible contar con un modelo de topodensidad, el cual no teníamos en la primera versión, además se hizo la adecuación de algunos de los insumos, utilizando aquellos que se van mejorando.

PRECISIÓN ESTIMADA

La evaluación para determinar la precisión obtenida en la solución geoidal, se realizó de la siguiente manera:

- Utilizando la altura ortométrica (H) de los bancos de nivel de precisión (BNP) junto con observaciones de altura geodésica (h) obtenida con GPS, se calculó su altura

geoidal (N) con la ecuación $N=h-H$. La altura geoidal obtenida de esta manera se toma como parámetro de referencia contra el cual se compara la altura geoidal del modelo correspondiente a cada banco, la diferencia de ambas alturas geoidales se considera un error y en base a esos valores se obtiene el error medio cuadrático estimado.

- Se tuvo especial cuidado en que todos los bancos de nivel estuvieran ajustados al NAVD88.

En 2004 el modelo GGM04 fue evaluado con base en 1377 puntos con observación GPS/BNP sobre el área mexicana, y las diferencias en metros entre alturas geoidales fueron las siguientes:

Diferencia positiva mayor	3.033
Diferencia negativa mayor	-3.557
Diferencia promedio	-0.165
Error medio cuadrático	0.586
Desviación estándar	0.562

En 2005 la evaluación del modelo GGM05 basándose en los mismos 1377 puntos, produjo las siguientes cifras:

Diferencia positiva mayor	3.330
Diferencia negativa mayor	-3.047
Diferencia promedio	0.077
Error medio cuadrático	0.436
Desviación estándar	0.436

Sin embargo después de haber detectado que 64 de los 1377 puntos, contenían información errónea en alguna de las alturas de referencia, fueron eliminados del conjunto original y se añadieron otros 74 puntos de levantamientos recientes, quedando 1384 puntos de referencia para generar una nueva evaluación.

Tomando en consideración lo anterior se generó una nueva tabla de diferencias para cada modelo y el resultado de comparar estos 1384 puntos fue el siguiente:

GGM04		GGM05	
Diferencia positiva mayor	1.372	Diferencia positiva mayor	1.560
Diferencia negativa mayor	-2.053	Diferencia negativa mayor	-1.057
Diferencia promedio	-0.125	Diferencia promedio	-0.104
Error medio cuadrático	0.467	Error medio cuadrático	0.356
Desviación estándar	0.467	Desviación estándar	0.356

A pesar de que el número de puntos con diferencias mayores a 1 metro representan un porcentaje bajo en relación al total, es necesario detectar la fuente del sesgo que se presenta en esas zonas y corregirla.

Las diferencias obtenidas pueden deberse a:

- a) El modelo geoidal presente un sesgo en esa zona debido a faltas de exactitud o de cobertura en los insumos utilizados, como datos de gravedad puntual, modelos digitales de elevación, etc.
- b) Los datos de altura geodésica presenten errores inducidos por deficiencias en la aplicación de la metodología de posicionamiento con GPS/BNP, o durante su procesamiento.
- c) El dato de altura ortométrica de los BNP ajustados a la red NAVD88 haya perdido vigencia debido a desplazamientos del terreno, como subsidencia local, movimientos de corteza terrestre, entre otros. En este caso el problema surge porque las observaciones GPS han sido realizadas en una época distinta (25 años) a la correspondiente al ajuste de la red NAVD88.

DATOS DE ENTRADA

Gravedad terrestre

En los cuatro últimos años se le ha dado mayor impulso a los levantamientos gravimétricos y se ha puesto especial cuidado en rescatar aquellos valores que en su momento fueron obtenidos en campo pero que por diferentes causas no se habían procesado.

Un aspecto que esta tomándose en cuenta es realizar una densificación enfocada a cubrir de manera regular todo el país, para lo cual está implantándose una metodología para que la distribución puntual de la gravedad permita obtener un modelo geoidal con una precisión uniforme en todo México.

Anteriormente la observación de la gravedad se realizaba sobre las vías de comunicación, principalmente en aquellas que estaban pavimentadas, y en menor porcentaje en marcas geodésicas existentes de programas anteriores del Instituto, ocasionando una irregular cobertura a nivel nacional, con zonas densamente cubiertas y otras con deficiente cobertura.

En la actualidad la medición se realiza con algunos criterios básicos que ayuden a distribuir mejor la cobertura nacional, ésta se basa en la carta topográfica 1:50,000, la cual se divide en una gradícula con celdas de 5'x5', en las cuales se debe medir por lo menos cuatro puntos regularmente distribuidos, si dentro de la mencionada celda se encuentra algún punto monumentado posicionado con GPS, se le dará preferencia para medirle la gravedad.

Un aspecto en el que se ha puesto particular interés es en el mantenimiento y depuración de la base de datos gravimétricos, la cual se ha validado, actualizado y aumentado con toda aquella información que en su momento no fue anexada por diferentes causas.

Gravedad Marina

Los datos de gravedad marina fueron derivados de la misión satelital TOPEX/Poseidón, la cual fue lanzada en 1992, en un proyecto conjunto entre el Centro Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES) y la NASA para modelar la topografía de la superficie oceánica.

Modelo Geopotencial Global

En el proceso de una solución geoidal gravimétrica, el modelo geopotencial interviene con una doble función, por una parte provee una referencia para calcular la anomalía de gravedad de Helmert (necesaria en el esquema de solución de Stokes-Helmert) en áreas con escasez de datos y por otra, sirve como geoide de baja frecuencia al que se le suma la parte residual (llamada también parte de alta frecuencia).

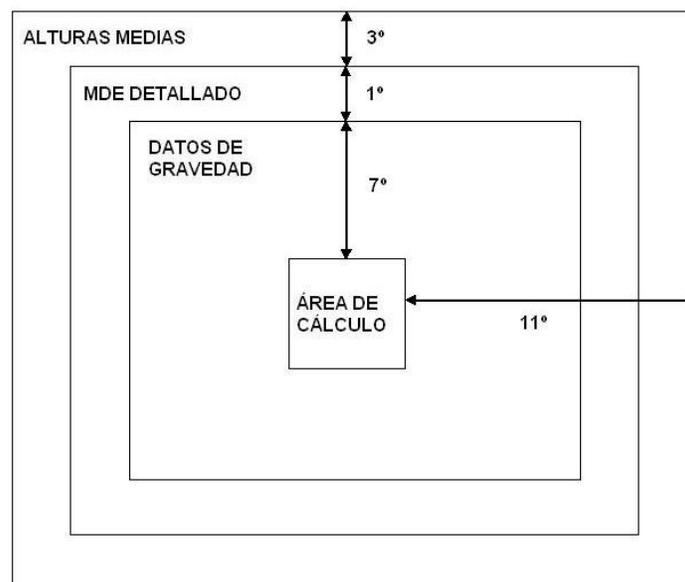
Durante los procesos de cálculo computacional fueron utilizados los modelos geopotenciales EGM96, y el Grace gravity model (GGM02) del Instituto alemán GFZ.

Modelos digitales del terreno

Para el cálculo del modelo geoidal son necesarios varios pasos intermedios para determinar efectos y correcciones relacionados con el campo de gravedad. La determinación de estos dependen en gran medida de los modelos digitales de elevación en diferentes resoluciones y coberturas.

- Un modelo digital de elevaciones detalladas en resolución de 1"x1" que debe cubrir 8 grados alrededor de la zona de cálculo. El modelo utilizado fue el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), el cual fue elaborado en el INEGI, a partir de los modelos existentes en formato de carta 1:50000 y complementado con información del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- También un modelo de alturas medias, en dos resoluciones distintas 30"x30" y 2.5'x2.5' con cobertura de 11 grados alrededor de la zona de cálculo, el cual se obtuvo combinando alturas promedio del CEM y del modelo Global de Topografía con resolución de 30" (GTOPO30), del USGS (United States Geological Center).
- Por último es necesario un modelo global de alturas para estimar efectos topográficos de zonas lejanas a los puntos de cálculo, se utilizó el modelo global de la Universidad Tecnológica de Graz en Alemania (TUG87).

La cobertura recomendada se especifica en la siguiente gráfica:



Otros modelos utilizados

La información del campo de gravedad más allá de los 8 grados de la zona de cálculo, también afecta la determinación local del geoide, y para estimar estos efectos se utiliza un modelo geopotencial de cobertura global. Para el cubrimiento global fueron utilizados los modelos EGM96 y el modelo de campo de gravedad global Grace gravity model GGM-02 elaborado por un equipo multinacional de USA y Alemania.

Además de toda esta información se requiere aplicar una corrección por densidad de masas topográficas, para lo cual fue necesario incluir un modelo regional de densidad superficial, el que fue elaborado en el INEGI como un derivado de la carta geológica y utilizado para el cálculo del GGM05.

MÉTODO DE CÁLCULO

El GGM05, es un geoide gravimétrico y fue calculado usando la técnica Stokes-Helmert, el planteamiento de esta técnica tiene un soporte teórico sólido y fue desarrollada en la Universidad de New Brunswick (UNB) bajo el liderazgo del Dr. Petr Vanicek con el objetivo de considerar todos los fenómenos que afectan la posición del geoide en más de 1cm.

La técnica utilizada se basa en la evaluación de la integral de Stokes dentro de un espacio armónico de Helmert, para determinación de un geoide gravimétrico preciso y consta de los siguientes pasos básicos:

1. Formulación del problema de valor de frontera sobre la superficie terrestre.
2. Evaluación de las anomalías de gravedad de Helmert sobre la superficie terrestre.
3. Continuación descendente de las anomalías de gravedad de Helmert hacia el geoide.
4. Integración de Stokes (solución para el problema del valor de frontera de Stokes).
5. Transformación de alturas geoidales del espacio de Helmert al espacio real.

La implementación computacional de estos pasos se realizó con el paquete de programas SHGEO, que es propiedad de la UNB y fue desarrollado por el equipo del Departamento de Geodesia y Geomática. Los autores de los programas particulares son: M. Najafi, P. Novák, J. Janák, J. Huang y R. Tenzer. También mencionaremos a Z. Martinec, A. Kleusberg, L.E. Sjöberg, W.E. Featherstone, W. Sun, de quienes las investigaciones presentadas en sus documentos fueron incluidas en el programa SHGEO el que cuenta con rutinas específicas para la evaluación de efectos, correcciones y otros cálculos de manera que permite hacer análisis de datos en cada etapa del proceso.

VALOR AGREGADO

Durante la aplicación de los programas para calcular una solución geoidal para el área Mexicana se obtuvieron una serie de valores y modelos digitales que corresponden a los efectos y correcciones que son necesarios para llegar al producto final, estos valores representan productos adicionales que pueden ser utilizados en análisis y proyectos geodésicos.

DATOS RECIENTES

El programa de densificación gravimétrica del Instituto es permanente, lo que permite incrementar cada año el total de valores observados en el territorio nacional, aprovechando la distribución de personal a nivel nacional con la que cuenta el Instituto.

Se ha capacitado al personal que realiza las labores de campo para que estén concientes de la importancia de hacer levantamientos gravimétricos de alta calidad, dejando muy en claro que este es un insumo básico para la determinación de un modelo geoidal preciso.

CONCLUSIONES

La obtención del modelo geoidal GGM05 ha sido el resultado del aprovechamiento de la gran cantidad de información generada por los trabajos geodésicos del Instituto y de otras dependencias con las que se han tenido convenios de colaboración a través de los años.

La solución actual presenta las condiciones suficientes para ser usado en cualquier trabajo en el que se requiera contar con un error medio cuadrático de 40cm ó mayor.

Por otro lado, la falta de homogeneidad en la cobertura de los datos gravimétricos de entrada, se refleja en la escasez de observaciones sobre algunas zonas del país, por lo que deberán ser tomados en consideración los datos generados recientemente y seguir con un plan de densificación para lograr eventualmente contar con una solución de precisión homogénea en toda el área mexicana.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

INEGI, Dirección General de Geografía, Geoide Gravimétrico Mexicano, Metodologías y Sistemas de Consulta 2005, <http://www.inegi.gob.mx> .

INEGI, Dirección General de Geografía, Red Geodésica, Marco de Referencia para Información Geodésica 2005, <http://www.inegi.gob.mx> .

GFZ, Geodesy and Remote Sensing, Gravity Field and Earth Models 2005, http://www.gfz-potsdam.de/welcome_en.html .

Avalos David, Nuevo Modelo Geoidal para el Area Mexicana: GGM04, Octavo Congreso Nacional e Internacional de Ingeniería Topográfica, Colegio de Ingenieros Topógrafos A.C. Morelia, 3-5 Nov. 2004.

Janak Juraj, et. al., Stokes-Helmert's GEOid software Reference Manual, University of New Brunswick, Canada 2001.

Vanicek Petr, Krakiwsky E.J., Geodesy: the Concepts, Elsevier 2nd rev. ed., North-Holland, Amsterdam, 1986.

Vanicek P., Martinec Z., Stokes-Helmert scheme for the evaluation of a precise geoid, Manuscripta Geodaetica 19, pp. 119-128, 1994.

Avalos David, El Geoide para el Area Mexicana y sus Aplicaciones, Revista Notas núm. 20 pp. 25-30, INEGI, México 2002.

Dirección General de Geografía
Dirección de Investigación y Desarrollo
Subdirección de Investigación Geodésica
Departamento del Geoide