

MAPAS DE GRAVEDAD, ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA Y ANOMALÍAS MAGNÉTICAS DE VENEZUELA DERIVADOS DE DATOS SATELITALES

Nuris Orihuela Guevara, Andreína García

Resumen. Se presentan los mapas de gravedad y anomalía de Bouguer a escala 1:2.000.000 proyectada sobre la superficie topográfica, y anomalía magnética proyectada a 4000 metros de altura en la ventana geográfica 0° a 13° de latitud norte y 58° a 74° de longitud oeste. La base de datos utilizada cuenta con 188.072 puntos de muestreo con un espaciamiento de 1,9' (3,7 km). Los datos de gravedad se calcularon usando el Modelo Geopotencial Global del campo gravitatorio terrestre EGM2008, el cual se desarrolló a partir de datos satelitales de la misión Grace y con datos terrestres y marinos de la red mundial. El modelo de terreno utilizado es elETOPO2 V.2. Los valores de campo magnético se calcularon usando el modelo combinado EMAG2 el cual se desarrolló a partir de datos satelitales de la misión CHAMP, así como también con datos terrestres y marinos de la red mundial. El trabajo presenta la correlación entre las anomalías gravimétricas y las provincias geológicas para áreas de topografía inferior a 250 metros, y una revisión general de las expresiones de grandes rasgos estructurales de la geografía nacional. Adicionalmente, se hace una revisión general de las anomalías gravimétricas de las principales provincias geológicas; las anomalías presentadas al sur del Río Orinoco son en gran medida observadas por primera vez dada la escasa cobertura de estaciones terrestres y/o aéreas en el área; destacan las variaciones laterales de las anomalías gravimétricas asociadas con la plataforma centro norte-costera y la Cordillera de la Costa, la expresión gravitacional del Alto del Baúl, la posible existencia de un importante depocentro al sureste de la Cuenca Barinas-Apure y la presencia de altos de gravedad de longitud de onda corta en el Cratón de Guayana. El trabajo presenta una revisión general de las anomalías magnéticas de las principales provincias geológicas de la geografía nacional y clasifica magnéticamente a nuestro territorio en tres grandes franjas dominadas por anomalías positivas al norte, negativas en el segmento intermedio y compuestas al sur de nuestro territorio.

Palabras clave: Modelo combinado, Gravimetría, Gravedad satelital, Anomalía magnética, Provincias geológicas.

Extended Abstract. We present three 1:2.000.000 scale maps of absolute gravity, Bouguer anomaly and total magnetic field anomaly of Venezuela, in the geographic window 0° to 13° north latitude and 58° to 74° west longitude. The absolute gravity and Bouguer anomaly are projected at mean sea level, while the total magnetic field anomaly is projected to 4.000 meters above the mean sea level. The database used for the construction of each map has 188,072 sampling points with a spacing of 1.9' (3. 7 km). Absolute gravity was obtained from the Venezuelan satellite gravity database. The calculation of the Bouguer anomaly was made from the absolute gravity and ETOPO2v2 terrain model. The total magnetic field anomaly was calculated using the combined model EMAG2, which was developed from satellite data of the CHAMP mission, and land and marine data from the global network. This contribution presents a general review of the absolute gravity, Bouguer anomaly and total magnetic field anomalies of the major geological structural features of Venezuela, and it classifies the Venezuelan territory gravitationally and magnetically.

Main features in the absolute gravity map (Figure 1) from north to south are: Gravity high at the southern end of the arcs of the Lesser Antilles Arc and the extinct Aves arc, with a clear continuity in the first case with the platform of the Margarita Island, and the second with platform of Blanquilla Island (A), the gravity highs associated with the Netherlands and Venezuelan islands (B), a relative gravity low associated with Bonaire Basin (C) with a gravimetric high to the east of it. This feature seems to express continuity with the gravity high associated with the previously mentioned arcs.

In the Maracaibo Lake Basin the pronounced gravity low is highlighted, which is sub parallel to the Andean Mountain System (D) and the expression of Icotea Fault (E). Between the Barinas-Apure basin and Eastern basin, the gravitational expression of the Baúl uplift (F) is highlighted, which is evidenced by a significant gravity high that breaks the continuity between the above cited basins; it expresses little sedimentary development potential of Guárico sub-basin, and it extends to

the northeast in the basement of Anzoátegui State (G) marking the northern flank of the now known Espino Graben (H). In the Maturín sub-basin, there is a gravity low associated with the depocenter of the basin (I), which is expressed as a discontinuous low, highlighting the expression of the faults present in the zone (Urica, San Francisco, among others), as well as their prolongation into the basin (J). At the eastern end, the map shows a gravity high at the southern limit of the Orinoco Delta (K), with NW-SE direction, defining the southwestern containment of a wide channel of low gravity that extends sub parallel to the Atlantic coast of northern South America (L), which changes its direction between the parallels 10 and 11 north to join the band of low gravity related to the accretionary prism of the Lesser Antilles (M).

The gravity anomaly map (Figure 2) shows from north to south: Positive gravity anomalies in the range from 269 to 86 mGal in the area bounded by the south end of the arcs of the Lesser Antilles and Venezuelan and Netherlands Antilles, the southern end of Venezuela and Grenada Basins, and the eastern end of the north central coastal platform. The distribution of these contours reflects a semicircular geometry, with concavity to the north, as an expression of tectonic stress pattern derived from an evolution of the transpressive zone of the plate boundary, with convergent extremes in the western and eastern boundaries, which result in a concave confinement scheme on both edges, in the early stages of evolution as well as in the present, giving as a result the pattern of contours mentioned above. The gravity anomalies in the physiographic provinces are distributed, in general, with negative abnormal intervals, as is characteristic of continental areas. This trend is broken in the central plains region, where a strong positive anomaly is observed. In the Andean region of low gravity, the contours are interrupted by a high, accented by short wavelengths associated with outcrop areas of high density. It is noteworthy that in the eastern part of Anzoátegui and Monagas states, a negative gravity anomaly is associated with the Venezuela eastern basin with a minimum of -269 mGal. The Guiana Shield is characterized by the dominance of negative gravity anomalies, distributed between 0 and -120 mGal, with smaller areas of sparse positive gravity anomalies. The northeastern side of the shield and the Orinoco delta front are characterized by a positive gravity anomaly that extends eastward to reach the domain of positive anomalies characteristic of the shelf in the Atlantic

Ocean.

The total magnetic field anomaly map (Figure 3) shows magnetic anomalies expressed as compound features associated with magnetic highs and lows that complement each other positively or negatively, depending on the magnetic susceptibility contrasts and the relative position of the bodies with respect to the total field vector orientation in the study area. The islands systems present magnetic anomalies in the range of -132 to 175 nT. The magnetic anomaly to the north of the Aves Island and the Los Roques Archipelago is interesting due to the values in the range from -130 to -35 nT with preferential direction N78°W, which is sub-parallel to the Curaçao high. The center of this anomaly is slightly shifted southward with respect to the main axis of the Curaçao high. The Coastal Range is characterized by the presence of abnormal values in the range from -22 to 36 nT, with preferred orientation N94°W. The Interior Range is distinguished by magnetic contours in the order of -3 to 34 nT, with preferred east-west orientation. The southern limit of the Araya Peninsula has very well-defined contours of anomalies with preferred east-west direction; its range is between 49 to 60 nT, and follows the preferential orientation of the El Pilar fault. The eastern part of the Cariaco Trough is distinguished by a high magnetic anomaly of the Araya Peninsula; the length of this high is about 40 km and has values in the range of 18 to -28 nT. The geographic window between the parallels 4° and 6° and the meridians 61° and 64° has no magnetic data available. The magnetic response is mainly positive in Guayana Craton. Over the course of the Orinoco River, a magnetic corridor is present with a preferential direction N59°E, with values ranging from -371 to -56 nT, representing the area of low magnetic anomalies most relevant and extensive of the Venezuelan territory. In the Barinas-Apure Basin, an eastern alignment shows a low magnetic anomaly in the direction N70°E with values in the range of -56 to -155 nT. This area is a strip of magnetic anomalies of great importance, that divides the territory in NE-SW direction. Due to limitations of the original source of data used to generate the map, there is not enough information available to extend the analysis of magnetic anomalies to the region of the Andean mountain system.

Keywords: Anomaly, Magnetism, Geology, Gradient, Satellite, Gravity, Venezuela.

INTRODUCCIÓN

Existen relativamente pocas mediciones directas de la gravedad absoluta en la superficie de la tierra, debido a las dificultades de transporte y manejo de los gravímetros para este propósito; sin embargo, actualmente se dispone de una gran cantidad de datos de gravedad obtenidos mediante mediciones satelitales y los correspondientes mapas para todo el planeta. Los mapas de gravedad absoluta tienen como ventaja la posibilidad de visualización no perturbada por reducciones matemáticas de los valores de atracción de gravedad en cualquier punto sobre la superficie terrestre, y como desventaja la fuerte influencia de los desniveles topográficos sobre el valor medido. De acuerdo con esto, en Venezuela, un mapa de gravedad absoluta sería útil en las cuencas sedimentarias terrestres y marinas, pero de menor utilidad en zonas montañosas y en el Cratón de Guayana.

Existen nuevas formas para obtener información de los campos de gravedad y magnético de la tierra, en años recientes se han presentado diversas publicaciones que tratan el tema (Abdelrahman *et al.* 2001; Holom & Oldow, 2007; Shin *et al.* 2006; Braatenberg & Ebbing, 2009), en gran medida gracias a la existencia de nuevos recursos tecnológicos para el rápido procesamiento de grandes volúmenes de datos; por el uso masivo de sistemas de geoposicionamiento global; por la existencia de modelos digitales de terreno de fácil acceso y por la actual disponibilidad de valores de gravedad y magnetismo producto de las misiones satelitales. El utilizar mapas de gravedad observada implica un importante cambio de paradigma para los geofísicos que a nivel mundial se dedican a esta rama de la geociencia, que asumen la compensación de efectos asociados a la topografía planetaria al momento de interpretar sobre mapas de anomalías y que en este caso deben ser capaces de leer el subsuelo a pesar del efecto asociado a la gravedad de los accidentes topográficos. Si esta forma de trabajar permite mejorar nuestro conocimiento geológico al menos en las áreas de topografía baja, bien vale la pena empezar a incorporar esta nueva herramienta en las opciones de los geocientíficos intérpretes. Disponer de una malla regular de medidas representa la condición necesaria para generar mapas de anomalías capaces

de representar el comportamiento de las variaciones de densidad/susceptibilidad del subsuelo con elevada estabilidad espacial. A partir de los valores de gravedad del modelo combinado EGM2008 (Pavlis *et al.* 2012), el cual se desarrolló a partir de datos satelitales de la misión Grace (2002), y del modelo digital de terreno seleccionadoETOPO2 V.2 (NGDC, 2006) se redujo la gravedad absoluta hasta estimar la anomalía de Bouguer de cada punto de muestreo (García, 2009). Para ello se estimaron las correcciones de altura, Bouguer y topográfica utilizando una densidad de Bouguer 2,67 g/cm³. Similar trabajo se realiza para los datos magnéticos a partir del modelo combinado EMAG-2 (Maus *et al.* 2009) el cual fue reducido a una altura de referencia de 4000 metros.

GRAVEDAD Y PROVINCIAS GEOLÓGICAS

En la Figura 1 se presenta el mapa de gravedad absoluta de Venezuela. De norte a sur destacan en este mapa: altos de gravedad en el extremo sur de los arcos de las Antillas Menores y el extinto Arco de Aves, con clara continuidad en el primer caso con la plataforma de la Isla de Margarita y en el segundo con la plataforma de la Isla La Blanquilla (A), los altos de gravedad asociados con las islas Holandesas y Venezolanas (B), un bajo relativo asociado a la Cuenca de Bonaire (C) con un alto gravimétrico al este de la misma, que parece expresar continuidad con los altos de gravedad asociado a los arcos previamente citados.

En la Cuenca del Lago de Maracaibo destaca el pronunciado bajo gravimétrico subparalelo al Sistema Montañoso Andino (D) y la expresión de la Falla de Icotea (E). Entre las cuencas Barinas-Apure y Oriental se destaca la expresión gravitacional del Alto del Baúl (F), el cual se evidencia por un significativo alto de gravedad que rompe la continuidad lateral entre las cuencas antes citadas, expresa escaso potencial de desarrollo sedimentario en la sub-cuenca de Guárico y se extiende al noreste en el subsuelo del estado Anzoátegui (G), marcando el flanco norte del hoy conocido Graben de Espino (H). En la sub-cuenca de Maturín, se observa un acentuado bajo de gravedad asociado al depocentro de la cuenca (I), el cual se expresa como un bajo discontinuo, destacando la expresión de la prolongación en la cuenca de las fallas presentes en

la zona (Urica, San Francisco (J)). En el extremo oriental del mapa se observa un alto de gravedad en el extremo sur de la desembocadura del Delta del Orinoco (K), con orientación NW-SE, definiendo el flanco sur occidental de confinamiento de un ancho canal de baja gravedad que se prolonga subparalelo a la costa atlántica del norte de Suramérica (L), y que cambia de rumbo entre los paralelos 10 y 11 norte para integrarse en la franja de baja gravedad relacionada con la fosa y prisma de acreción del Arco de las Antillas Menores (M).

Si bien la interpretación cuantitativa de valores absolutos de gravedad en áreas montañosas se ve limitada por la influencia de la topografía en este tipo de medida, la interpretación cualitativa es una opción cuando se trata de rasgos estructurales mayores; es así como el mapa de la Figura 1 permite la clara delineación de la falla de Guri, marcando la frontera entre la Provincia de Imataca y el Complejo Supamo, en el Escudo Guayanés.

El depocentro de la Cuenca Oriental de Venezuela cuenta con varios sub depocentros cortados por el sistema de fallas oblicuos (Urica, San Francisco) presente en la zona. Adicionalmente, se puede indicar que la Falla de San Francisco segmenta la Serranía del Interior y en el extremo oriental de la cuenca, dentro del Golfo de Paria, se refleja un subdepocentro de sedimentos confinado entre las fallas de Bohordal y El Soldado (Audemard *et al.* 2006).

En la región norcentral, el sistema de fallas Tacagua – El Ávila, desplaza en sentido noroeste al Macizo Montañoso del Ávila, marcando una desviación de la cresta de la Cordillera de la Costa y evidenciando la importancia del sistema de fallas oblicuas presentes en la neotectónica de la zona.

La prolongación en suelo marino de la Falla Tacagua-El Ávila marca la frontera entre dos condiciones del basamento de la plataforma centro norte costera del país. Al este de esta prolongación se visualiza un basamento marino poco profundo, y al este (Cuenca de Bonaire) la respuesta gravitacional refleja la presencia de un basamento más profundo. En la región occidental se puede destacar la presencia de un marcado bajo gravimétrico entre las penínsulas de la Guajira y Paraguaná con prolongaciones de orientación

noroeste sureste, paralelas al sistema de fallas oblicuas presentes en la zona y extendiéndose dentro de territorio colombiano.

PRINCIPALES RASGOS DE LA ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA Y SU RELACIÓN CON LAS PROVINCIAS GEOLÓGICAS

En la Figura 2 se presenta el mapa de anomalía de gravedad de Venezuela, tomando como base de cálculo la reducción a anomalía de Bouguer previamente descrita. La ventana geográfica en estudio 0° a 13° de latitud norte y 58° a 74° de longitud oeste, representa un área de 2.562.768 km². Dentro de la misma, se proyectaron 188.072 valores de gravedad absoluta con un espaciamiento de 1,9' (3,7 km) sobre la topografía, cubriendo la totalidad del territorio venezolano así como parte de países vecinos.

De norte a sur destacan en este mapa: anomalías gravimétricas positivas en el rango de 269 a 86 mGal en la zona comprendida por el extremo sur de los arcos de las Antillas Menores y las Antillas de Sotavento, el extremo sur de las cuencas de Venezuela y Grenada y el extremo oriental de la plataforma centro norte costera. La distribución de estos contornos refleja una geometría semicircular, de concavidad norte, como expresión del patrón de esfuerzos tectónicos derivados de una evolución en zona de borde de placa transpresivo (Audemard, 2009), con extremos convergentes en los límites oriental y occidental, lo que determina un esquema de confinamiento cóncavo en ambos bordes, tanto en las fases tempranas de evolución como en las actuales, dando como consecuencia el patrón de contornos antes indicado.

La distribución cóncava de contornos previamente descrita se mantiene hasta la franja norte de la sección territorial del país, con anomalías comprendidas entre 1 y 57 mGal en las penínsulas Guajira y Paraguaná, el extremo oriental del estado Falcón, la franja norte del estado Yaracuy, el extremo oriental de la Cordillera de la Costa y la Serranía del Interior y las penínsulas de Araya y Paria. Dentro de esta franja destacan segmentos confinados, donde las anomalías gravimétricas se encuentran fuera del intervalo indicado y que serán objeto de análisis posterior.

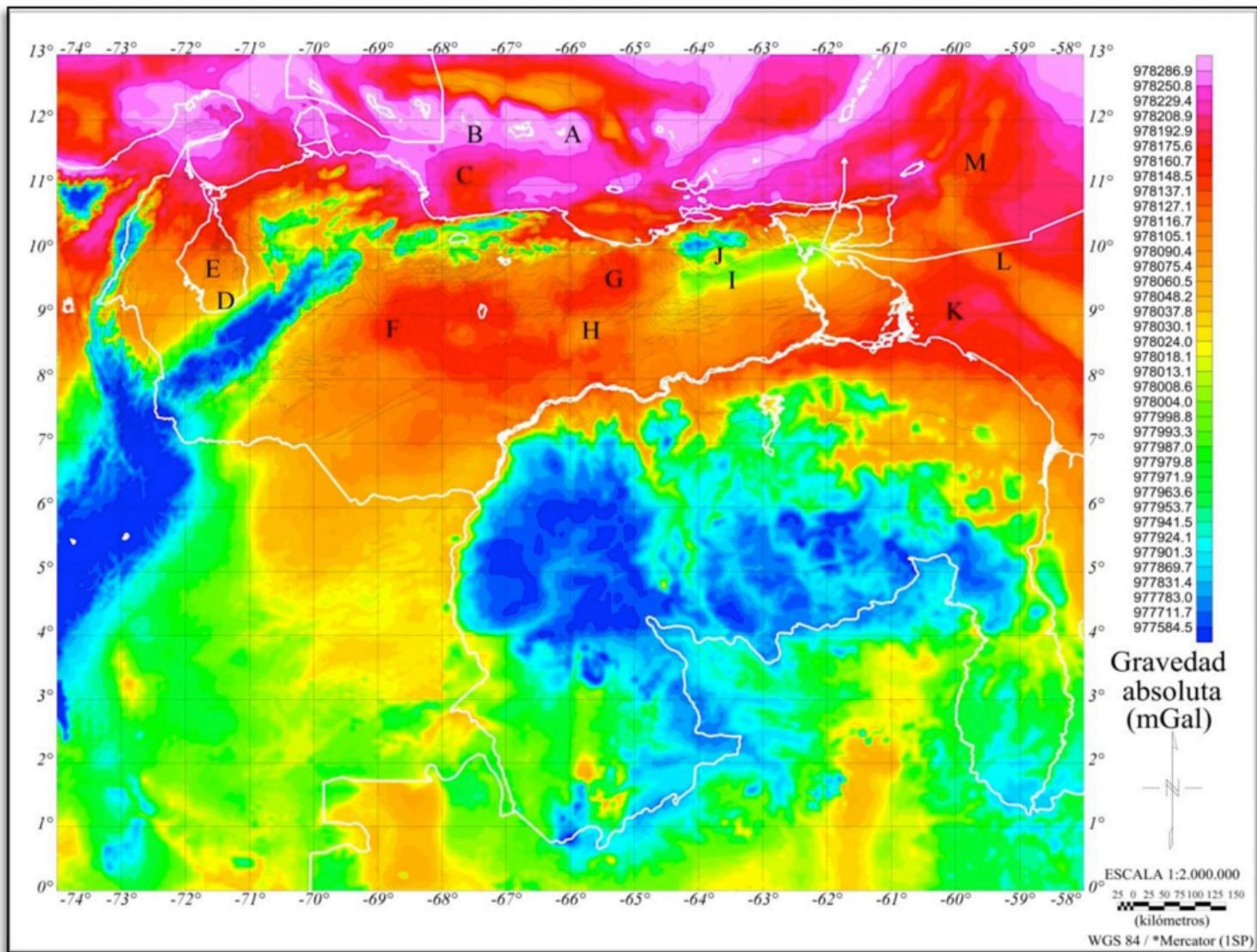


Figura 1. Mapa de gravedad absoluta de Venezuela.

Figure 1. Venezuelan absolute gravity map.

Las anomalías gravimétricas en las provincias fisiográficas interiores del país se distribuyen, en general, entre intervalos anómalos negativos como es característico de áreas continentales.

Esta tendencia se rompe en la región de los Llanos centrales donde destaca una marcada anomalía de signo positivo.

El extremo occidental del estado Falcón, la casi totalidad del estado Zulia (salvo la Sierra de Perijá y Guajira), la totalidad de los estados andinos y la franja occidental de los estados Barinas y Apure, los estados Lara, el sur de Yaracuy y Carabobo reflejan anomalías gravimétricas comprendidas de -21 a -89 mGal. En la región andina los bajos gravimétricos se ven interrumpidos por acentuados altos de longitud de onda corta, asociados con zonas de afloramiento de rocas intrusivas silíceas. El extremo oriental de los estados Barinas y Apure, la totalidad de los estados llaneros, el extremo oriental del estado Anzoátegui y el norte del estado Bolívar exhiben anomalías comprendidas entre -12 y 57 mGal. Destaca en la región oriental del estado Anzoátegui y en el estado Monagas una muy acentuada anomalía gravimétrica negativa, asociada con la Cuenca Oriental de nuestro país con un mínimo de -196 mGal.

El Escudo Guayanés se caracteriza por el dominio de anomalías gravimétricas negativas, distribuidas entre 0 y -120 mGal, con áreas menores de anomalías gravimétricas positivas dispersas. La franja nororiental del escudo y el frente deltano sur destacan por una anomalía gravimétrica positiva que se prolonga al este hasta alcanzar el dominio de anomalías positivas características de la plataforma marina del océano atlántico.

La Tabla 1 presenta los valores de la anomalía gravimétrica estimada a partir de la gravedad absoluta, derivada con modelos combinados que incorporan medidas con sensores satelitales en diversas localidades organizadas por provincias fisiográficas.

ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS DE INTERÉS

Dentro de la distribución general de anomalías descritas en la sección anterior, destacan segmentos que rompen la tendencia dominante y se expresan como anomalías de menor extensión, que resultan de especial interés.

Bajo este esquema, al norte de la Isla de Margarita se observa una franja de anomalía gravimétrica negativa, contrastando entre los altos gravitacionales de la prolongación de los arcos de Aves y Antillas

Menores, franja que se prolonga por más de 100 km, con orientación NE-SW y un ancho promedio de 25 km. Al sureste de la misma isla se observa una acentuada anomalía gravimétrica negativa de orientación NW-SE.

En el segmento occidental de la plataforma centro norte costera se observa la presencia de un segmento de bajos gravimétricos enclavado en medio de altos asociados, al norte con las islas Bonaire - Las Aves - Los Roques, al este con el alto gravitacional reflejado por la plataforma centro norte costera en su segmento oriental, y al oeste el alta gravitacional de Falcón occidental. Insertas en esta zona destacan alineaciones de altos y bajos relativos de orientación NW-SE.

Al noreste de la Península de Paraguaná se presenta una anomalía negativa de orientación NW-SE entre las islas de Aruba y Curazao, y una secuencia de bajos subparalelos a ésta, alineados con la costa oriental del estado Falcón. Entre los altos gravitacionales asociados con las penínsulas de Paraguaná y Guajira, destaca un bajo que se acuña contra el alto de la Goajira y su franja norte se prolonga al NW hasta el extremo norte de la Guajira colombiana.

El segmento central del Sistema Montañoso del Caribe, entre Golfo Triste y Cabo Codera, presenta una marcada variación lateral en la expresión de la anomalía gravimétrica, en consonancia con el contraste lateral descrito en la plataforma centro norte costera. La franja occidental se asocia con anomalías negativas, y el segmento oriental con anomalías positivas de gran amplitud, la franja de borde se puede asociar con el sistema de fallas oblicuas presentes en la zona.

Dentro de la extensa franja de anomalías positivas asociadas con el Alto de El Baúl, destaca una anomalía negativa de geometría circular rodeada de las anomalías positivas de mayor amplitud de los Llanos venezolanos. Resulta oportuno destacar que la geometría de esta expresión anómala se asemeja a una anomalía de impacto como las descritas en otras regiones de la geografía planetaria (Bevan, 1998; Koeberl & Henkel, 2005).

En el extremo suroriental del estado Apure destaca

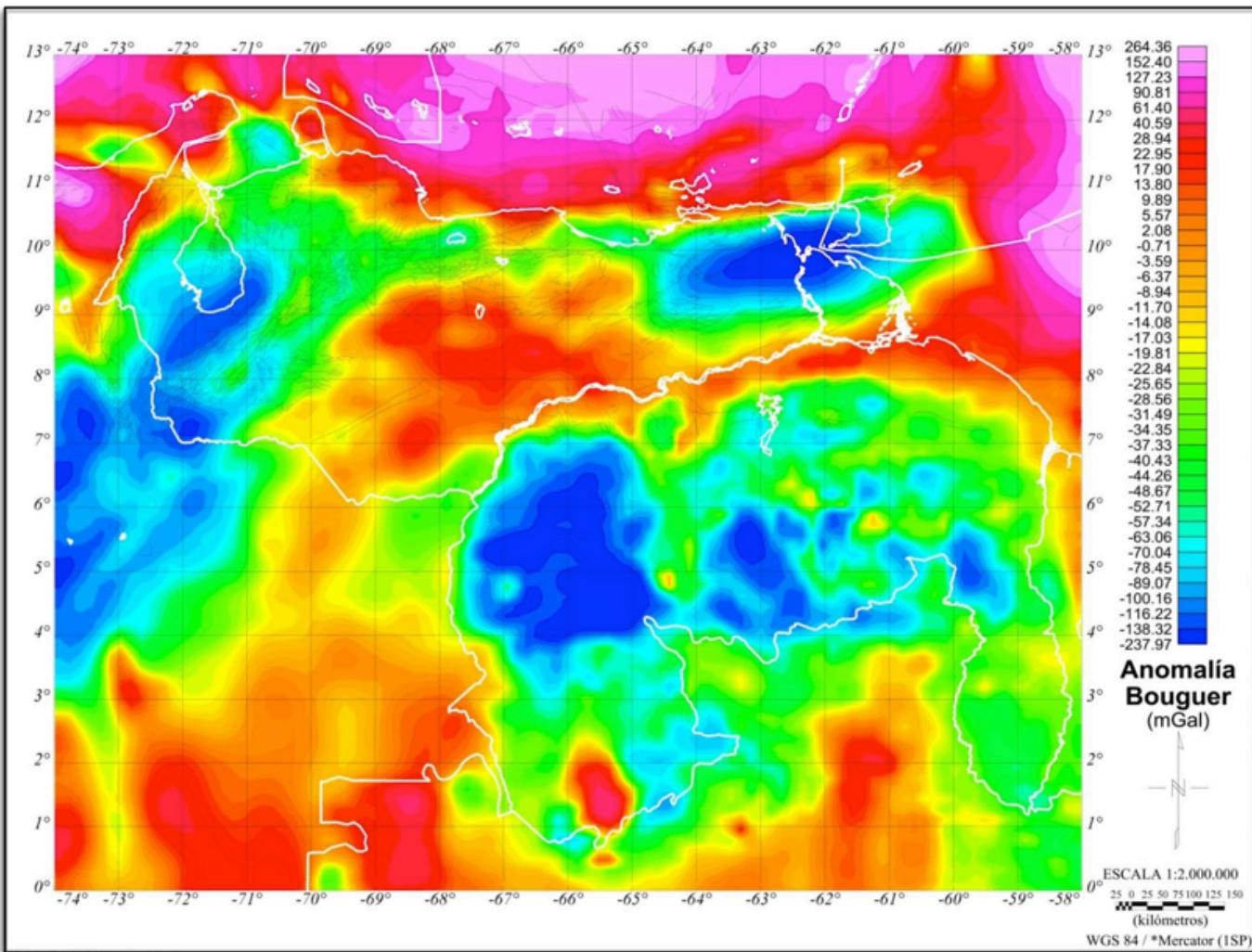


Figura 2. Mapa de Anomalía de Bouguer de Venezuela.

Figure 2. Venezuelan Bouguer anomaly map.

una franja de anomalías gravimétricas negativas que se prolonga dentro de territorio colombiano, que expresa la posible presencia de un importante depocentro de la cuenca, confinado entre la prolongación sur occidental del Alto de El Baúl y Escudo de Guayana.

Al sur del Río Orinoco se presentan un conjunto de anomalías positivas, de amplitud similar a los máximos positivos presentes en la zona del Alto de

El extremo oriental del Alto de El Baúl presenta una

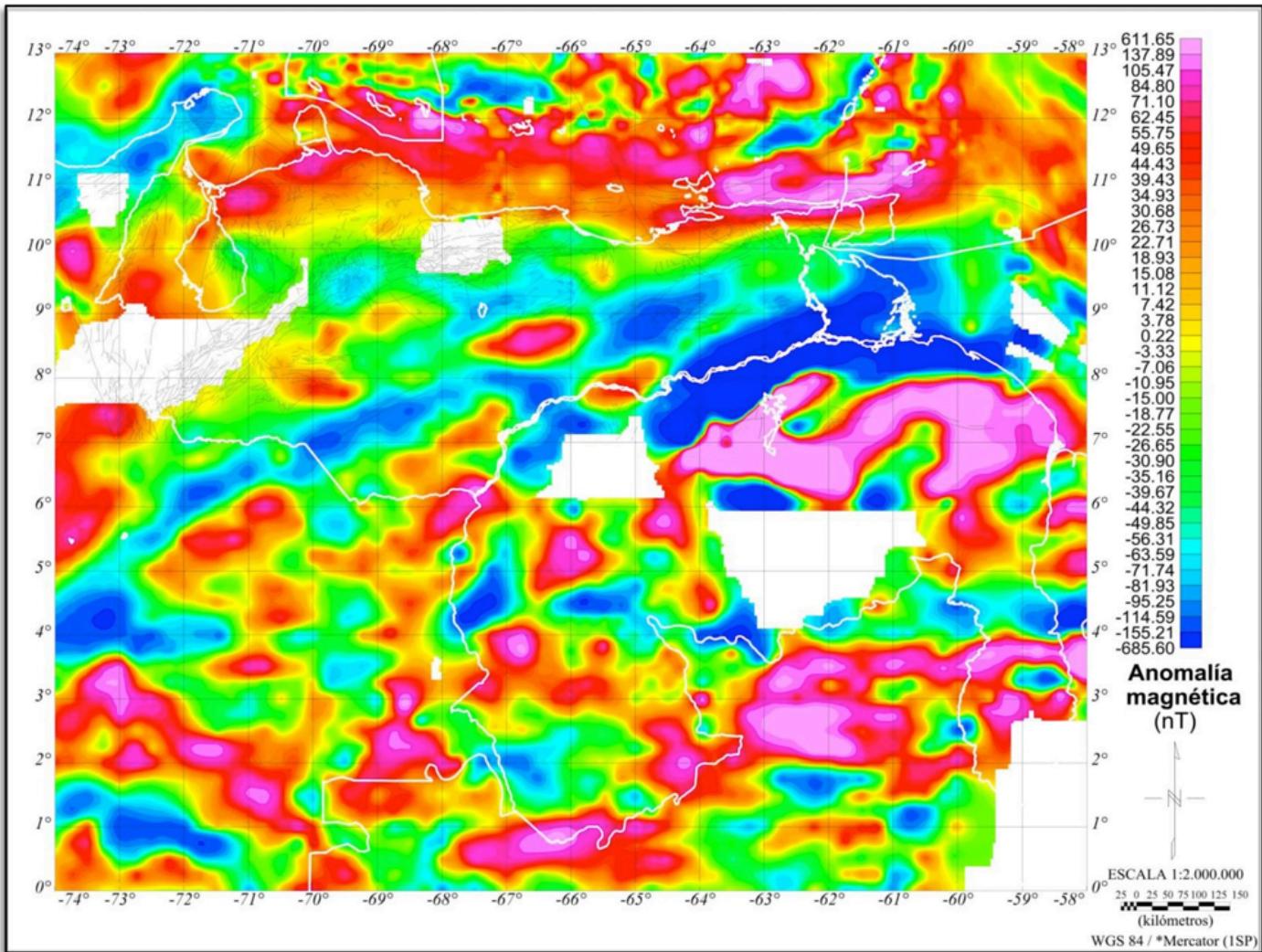


Figura 3. Mapa de Anomalías Magnéticas de Venezuela.

Figure 3. Venezuelan magnetic field anomaly map.

El Bañil. Esta franja se confina en la Provincia de Imataca, y se prolonga al este hasta el delta donde se expande y proyecta dentro de las anomalías positivas características de la corteza oceanica del océano Atlántico.

El Crafón de Guayana presenta anomalías positivas aisladas que rompen la conducta general asociada con anomalías negativas de la región. Entre las más interesantes, se encuentra una anomalía positiva de geometría ovalada localizada en el extremo sur del estado Amazonas. Pese a que no se identifican por

geología de superficie tipos rocosos con geometría similar a la anomalía descrita, la asociación de otras áreas anómalas con contrastes positivos en la región, orientan a pensar que el Super Grupo Roraima es el responsable de la mayoría de anomalías que destacan por la presencia de contrastes laterales positivos de densidad en el Escudo Guayanés.

ANOMALÍA MAGNÉTICA DE CAMPO TOTAL Y PROVINCIAS GEOLÓGICAS

En la Figura 3 se presenta el mapa de anomalía magnética de campo total de Venezuela, tomando como base de cálculo la anomalía magnética previamente descrita. La ventana geográfica en estudio 0° a 13° de latitud norte y 58° a 74° de longitud oeste, representa un área de $2.562.768 \text{ km}^2$. Dentro de la misma se proyectaron 188.072 valores de anomalía magnética, derivados del mallado de datos de anomalía magnética EMAG2 (Maus *et al.* 2009) con un espaciamiento de $1,9'$ ($3,7 \text{ km}$) a 4.000 m de altura sobre el nivel del mar, cubriendo la totalidad del territorio venezolano, así como parte de países vecinos. Las anomalías magnéticas se expresan como rasgos compuestos que asocian altos y bajos magnéticos que se complementan positiva- o negativamente en función de los contrastes laterales de susceptibilidad magnética y de la posición relativa de los cuerpos respecto a la orientación del vector campo total en el área de estudio.

Sistema insular: El sistema insular se caracteriza por la presencia de anomalías magnéticas en el intervalo de -132 a 175 nT. La orientación preferencial de los contornos permite la asociación de los bajos y altos observados, con la respuesta magnética del basamento de las Antillas holandesas y venezolanas, y al arco de las Antillas Menores, respectivamente. A partir de esta observación, se tiene que el rumbo preferencial de la respuesta magnética del basamento de las Antillas de Venezuela es de $N80^{\circ}\text{O}$ y la respuesta magnética del basamento del arco de las Antillas Menores tiene orientación preferencial $N29^{\circ}\text{E}$.

Se observa la presencia de altos de anomalías de campo magnético total ubicados al sur de la plataforma de las Antillas venezolanas y holandesas dentro del rango de 175 a -64 nT. Al norte de las

mismas destacan anomalías negativas, dentro del rango de -132 nT a -64 nT.

Resulta de interés la anomalía ubicada al norte de las islas las Aves y el Archipiélago Los Roques, cuyos valores están en el rango de -130 nT a -35 nT, con rumbo preferencial $N78^{\circ}\text{O}$, el cual es sub paralelo al Alto de Curazao. El centro de esta anomalía está levemente desplazado hacia el sur con respecto al eje principal del Alto de Curazao.

En la Península de Paraguaná se observa un bajo de anomalías magnéticas de orientación preferencial $N80^{\circ}\text{E}$ con valores entre -10 y 7 nT, el cual se prolonga del oeste hasta el sistema de fallas de Urumaco, con un alto subparalelo al sur del mismo en el rango de 86 a 52 nT.

Sistemas montañosos: La Cordillera de la Costa se caracteriza por la presencia de valores de anomalía en el intervalo de -22 nT a 36 nT, con orientación preferencial $N94^{\circ}\text{W}$. La Serranía del Interior se distingue por tener contornos magnéticos en el orden de -3 a 34 nT, con orientación preferencial este-oeste. Sobre el área de la Fosa de Cariaco se observan anomalías en el intervalo de 18 a 28 nT. Destaca un bajo de anomalía magnética ubicado entre los meridianos $65,5^{\circ}$ y $66,5^{\circ}$ oeste y entre los paralelos 10° y $10,5^{\circ}$; con un rango entre -49 y -29 nT, y una orientación preferencial de $N72^{\circ}\text{O}$, y un alto asociado con el sur, con valores en el rango de 11 nT y -6 nT.

El límite sur de la Península de Araya está muy bien delimitado, los contornos de anomalías tienen dirección preferencial este-oeste, su intervalo está entre 49 nT a 60 nT y sigue la orientación preferencial del sistema de fallas de El Pilar. La parte este de la Fosa de Cariaco se distingue por ser un alto magnético en el área de la Península de Araya, la longitud de este alto es de aproximadamente 40 km y sus valores están en el rango de 18 a 28 nT. Por limitaciones de la fuente original de datos utilizada para la generación del mapa presentado en la Figura 3, no se dispone de suficiente información para extender el análisis de anomalías magnéticas a la región del sistema montañoso andino.

Cratón de Guayana: Entre los paralelos 4° y 6° y los meridianos 61° y 64° no se dispone de datos

magnéticos. La respuesta magnética del cráton es principalmente positiva. A lo largo del curso del Río Orinoco se distingue un corredor magnético con una dirección preferencial N59°E y cuyos valores oscilan entre -371 nT y -56 nT, representando la zona de bajos de anomalías magnéticas más relevante y extensa del territorio venezolano. La misma se extiende desde el oeste del río Caura, hasta el Delta del Orinoco costa afuera y se asocia, al sur, con una zona de altos, en el intervalo de 16 nT y 319 nT. Esta anomalía compuesta se asocia con el contacto entre la Provincia de Imataca y el Complejo Supamo (González de Juana *et al.* 1980). En el estado Amazonas se distingue una alineación de altos magnéticos en el rango de -6 nT y 125 nT, presentados como cuerpos aislados, cuya alineación tiene una orientación preferencial N-S, la cual produce una forma cóncava hacia el este, y que podría ser de interés para la exploración minera de nuestro país.

Llanos Centrales: En las cuencas Barinas-Apure y Oriental se observa una alineación de bajos de anomalías magnéticas en dirección N70°E con valores en el rango de -56 nT y -155 nT. Esta zona constituye una franja de anomalías magnéticas de gran relevancia que divide el territorio en sentido NE-SW. Esta alineación principal de mínimos de anomalías magnéticas se extiende desde los Andes colombianos al sur, hasta el Delta del Orinoco, al este, y sin duda alguna, constituye uno de los rasgos más importantes de la respuesta magnética del subsuelo presente en el territorio venezolano.

La respuesta magnética del Alto del Baúl se puede asociar con dos anomalías positivas, sub paralelas y seccionadas por el bajo magnético de carácter regional descrito en el párrafo anterior. Estas anomalías se ubican entre los meridianos 65.5° y 67.5° oeste y los paralelos 8° y 9° norte, con un rango anómalo entre 0 nT y 95 nT, con orientación preferencial N70°E y el segundo, ubicado entre los meridianos 64.5° y 66° oeste y los paralelos 7.5° y 8.5° norte, el cual está en el rango de 0 nT a 53 nT, con una orientación preferencial aproximada de N67°E. En la Tabla 1 se presentan las anomalías magnéticas en diversas localidades de nuestro territorio, ubicadas sobre las provincias fisiográficas conocidas.

Tabla 1. Anomalías gravimétricas y magnéticas por localidad referencial en las provincias fisiográficas en Venezuela.

Table 1. Gravimetric and magnetic anomalies at reference locations of the physiographic provinces in Venezuela.

Provincia	Loc. Ref.	Lat. (°)	Long. (°)	A.G. (mgal)	A.M. (nT)
Sistema Insular					
Isla					
<i>Isla</i>	Los Monjes	12,33	-71,53	38	-69
<i>Isla</i>	Las Aves	12,03	-67,70	141	16
<i>Isla</i>	Los Roques	11,80	-66,60	114	70
<i>Isla</i>	La Orchila	11,80	-66,17	145	9
<i>Isla</i>	La Blanquilla	11,80	-64,47	162	49
<i>Isla</i>	La Tortuga	10,90	-65,33	17	31
<i>Isla</i>	Margarita	11,00	-63,93	32	51
<i>Isla</i>	Los Testigos	11,27	-63,57	107	19
Escudo Guayanés					
<i>Penillanura del norte</i>	Ciudad Piar	7,50	-63,30	-59	-307
<i>Penillanura del Casiquiare</i>	Curamoni	2,60	-66,20	-48	-34
<i>Tepuyes</i>	Chimatá-tepui	5,30	-62,07	-109	-9
Sistemas Montañosos					
<i>Sistema Andino</i>	Pico Bolívar	8,53	-71,03	-97	-2
	Perijá	10,13	-72,83	-22	-5
<i>Cordillera de la Costa</i>	Macizo Ávila	10,53	-66,80	-37	30
	Caracas	10,57	-66,47	39	4
<i>Serranía del Interior (oriental)</i>	Las Piedras	10,20	-63,60	-103	15
Llanos					
<i>Occidente</i>	El Yagual	7,50	-68,47	4	-121
<i>Centro</i>	Las Mercedes	9,13	-66,43	-13	-55
<i>Oriente</i>	Aguasay	9,43	-63,70	-120	-85
<i>Lago Maracaibo</i>	Bachaquero	9,90	-71,06	-82	-47
<i>Delta del río Orinoco</i>	Tucupita	9,13	-62,06	-52	-137

CONCLUSIONES

Los datos geofísicos producto de misiones satelitales constituyen una herramienta de trabajo de fácil acceso y con un elevado potencial para mejorar nuestro conocimiento del subsuelo planetario. En el caso venezolano, se dispone de datos de gravedad y magnetismo terrestre obtenidos en el transcurso de 70 años de prospección asociada con la industria petrolera y minera, así como el trabajo de grupos de investigación en la UCV y USB, estos datos se caracterizan por una distribución poco uniforme. Muy especialmente la gravimetría venezolana adolece de las limitaciones de la altimetría asociada, lo que también encuentra solución en los modelos digitales de terreno derivados de campañas satelitales. Los contornos de gravedad absoluta en las principales provincias geológicas de topografía inferior a 250 m presentan una clara correlación que aporta nueva información del subsuelo de nuestro territorio (Figura 1). En algunos casos, se presentan tendencias gravitacionales que invitan a la revisión de las caracterizaciones geológicas aceptadas a la fecha, ejemplo de ello es el Alto del Baúl, el cual tiene posible expresión gravitacional, bajo el subsuelo del estado Anzoátegui. En el caso del Graben de Espino no es posible reconocer, gravitacionalmente, la continuidad con los grabenes descritos en la cuenca Barinas-Apure. El mapa de anomalías gravimétricas a escala 1:2.000.000 es una herramienta de trabajo para todo investigador dedicado a la caracterización del subsuelo profundo de nuestro territorio. La posibilidad de contar con una malla de datos de disposición regular, garantiza la estabilidad espacial que antecede al cartografiado y con ello aumenta la confianza en la interpretación geológica de las diversas provincias presentes en nuestro país. El mapa que se presenta permite ratificar la calidad de los diversos trabajos publicados en gravimetría terrestre en Venezuela (Graterol, 1988; Rodríguez, 1974, 1977; Rodríguez & Orihuela, 1990; Orihuela 1990) a lo largo de últimos 40 años.

El producto presentado abre interesantes campos de discusión en torno a la caracterización geológica de varias provincias de nuestro país, en las que aparecen expresiones gravitacionales anómalas de compleja correlación con las descripciones geológicas hoy día aceptadas para estas regiones.

Este es el caso de la Cordillera de la Costa, del Alto de El Baúl, del Graben de Espino, entre otros. Adicional interés revisten las anomalías gravimétricas de longitud corta del escudo guayanés, que podrían vincularse con posibles yacimientos mineros. También la posible presencia de un depocentro de interés petrolífero al sureste de la Cuenca Barinas-Apure.

Se puede dividir magnéticamente nuestro territorio en tres grandes franjas, la primera asociada con el Sistema Montañoso del Caribe y la plataforma continental, dominada por altos magnéticos propios de los contrastes asociados con la presencia de rocas ígneas y metamórficas en afloramiento o a poca profundidad en el subsuelo de la región. La segunda zona se extiende de los piedemontes hasta las cuencas de nuestro territorio donde dominan anomalías magnéticas negativas destacando el corredor magnético regional que se prolonga desde los llanos colombianos hasta la Cuenca Oriental de Venezuela. La tercera, asociada con Cratón de Guayana y a la franja sur de la Cuenca Barinas-Apure, que se caracteriza por anomalías magnéticas compuestas, que se prolongan en los llanos colombianos y que se encuentran limitadas al norte por el corredor regional de anomalías negativas en la zona central de las tres descritas en estas conclusiones. El mapa que se presenta permite ratificar la calidad de los diversos trabajos publicados en magnetometría en Venezuela (Bonini, 1984; Feo-Codecido *et al.* 1984; González, 2006; Meneven, 1983) a lo largo de últimos 40 años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen las facilidades para la utilización de las bases de datos del International Center for Global Gravity Field Models (ICGEM) y del National Geophysical Datacenter (NGDC) y el apoyo brindado por Franz Barthelmes y Stefan Maus.

REFERENCIAS

- ABDELRAHMAN, E.-S., EL-ARABY, T.M., EL-ARABY, H.M., ABO-EZZ, E.R. (2001). A new method for shape and depth determinations from gravity data. *Geophysics*, 66(6), 1774-1780.
 AUDEMARD, F., SINGER, A., SOULAS, J. (2006). Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Rev. Soc. Geol.*

- Argent. 61(4), 480-491
- AUDEMARD, F. (2009). Key issues on the post-Mesozoic Southern Caribbean Plate boundary. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 328, 569-586, doi:10.1144/SP328.23
- BEVAN, M. (1998). Traces of catastrophe, a handbook of shock-metamorphic effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution N° 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 p.
- BRAITENBERG, C. & EBBING, J. (2009). New insights into the basement structure of the best Siberian Basin from forward and inverse modelling of Grace Satellite Gravity Data. *J. Geophys. Res.* 114, B06402, doi:10.1029/2008JB005799.
- BONINI, W. (1984). Magnetic provinces in western Venezuela. The Caribbean American Plate Boundary and Regional Tectonics, *Geol. Soc. Am. Mem.* 162, 161-173.
- FEO-CODECIDO, G., SMITH, F., ABOUD, N., DI GIACOMO, E. (1984). Basement and Paleozoic rock of the Venezuelan Llanos basins. The Caribbean American Plate Boundary and Regional Tectonics. *Geol. Soc. Am. Mem.* 162, 175-187.
- GARCÍA, A. (2009). Mapas de anomalías de gravedad y magnetismo de Venezuela generados a partir de datos satelitales. Trabajo de Grado, Universidad Central de Venezuela, 208 p. Base de datos disponible en <http://www.abae.gob.ve>.
- GRACE MISSION. (2002). Gravity Recovery and Climate Experiment. NASA Earth System Science Pathfinder. Recuperado el 15 de mayo de 2009, de <http://www.utexas.edu/grace>.
- GRATEROL, V. (1988). Mapa de Anomalía de Bouguer de la República de Venezuela 1:2.000.000. Dirección de Cartografía Nacional, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE, M., PICARD, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas: Ed. Foninves, Vol 1.
- GONZÁLEZ, W. (2006). Compilación de datos magnéticos en el norte de Venezuela y el Caribe y un estudio de prueba en el graben de Espino. Trabajo especial de grado, Universidad Simón Bolívar, p. 155.
- HOLOM, D. & OLLOW, J. (2007). Gravity reduction spreadsheet to calculate the Bouguer anomaly using standardized methods and constants. *Geosphere*, 3(2), 86-90.
- KOEBERL, CH. & HENKEL, H. (2005). *Impact Tectonics*. Springer, New York, 552 p.
- NGDC. (2006). ETOPO2 V.2, 2-Minute Gridded Global Relief Data. NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION & U.S. DEPT. OF COMMERCE. Estados Unidos. Recuperado el 14 de mayo de 2009, de: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>.
- MAUS, S., BARCKHAUSEN, U., BERKENBOSCH, H., BOURNAS, N., BROZENA, J., CHILDERS, V., DOSTALER, F., FAIRHEAD, J., FINN, C., VON FRESE, R., GAINA, C., GOLYNSKY, S., KUCKS, R., LÜHR, H., MILLIGAN, P., MOGREN, S., MÜLLER, R., OLESEN, O., PILKINGTON, M., SALTUS, R., SCHRECKENBERGER, B., THÉBAULT, E., CARATORI, Y. (2009). EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine measurements. *J. Geophys. Res.*, Estados Unidos, DOI: 10.1029, p. 30.
- MENEVEN. (1983). Informe inédito para CORPOVEN: Aeromagnetic Survey 1981-1982, Contract CAR-62. Canadá, GEOTERREX LTD, p. 120.
- ORIHUELA, N. (1990). Investigación gravimétrica de la Cordillera de la Costa, sector norcentral. Trabajo de ascenso. Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Inédito.
- PAVLIS, N., HOLMES, S., KENYOU, S. & FACTOR, J. (2012). The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGN2008). *J. Geophys. Res.* 117(B04406), doi:10.1029/2011JB008916.
- RODRÍGUEZ, I. (1974). Investigación gravimétrica en la región noroccidental de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Inédito.
- RODRÍGUEZ, I. (1977). Investigación de la Faja Petrolífera del Orinoco por métodos geofísicos no convencionales. Instituto Tecnológico-Foninves, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Inédito.
- RODRÍGUEZ, I. & ORIHUELA, N. (1990). Investigación gravimétrica en la región oriental de Venezuela. Instituto Tecnológico, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Inédito.
- SHIN, Y.H., XU, H., PARK, P.H., PARK, J.U. (2006). Folding of Moho and GPS Survey in Tibet. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden.