

## Estudio sísmico-gravimétrico del margen meridional de la placa Caribe

### *Seismic-gravimetric study of the southern margin of the Caribbean Plate*

### *Estudo sísmico-gravimétrico da margem meridional da placa Caraíbas*

Ignacio Mederos<sup>1</sup> Antonio Ughi<sup>2</sup> Dionisio González<sup>3</sup>

Recibido: 1-7-17; Aprobado: 15-11-17

Resumen	Abstract	Resumo
Se interpretaron datos topográficos, batimétricos y sísmicos con el propósito de modelar el compartimiento estructural del margen meridional del Caribe a distintas edades para, de esta manera, comparar los resultados con los modelos de evolución postulados en investigaciones previas. De la integración de la información se generaron mapas gravimétricos y de topos estructurales marcadores de las edades geológicas, los cuales ilustran la geometría y comportamiento de las estructuras a lo largo de la evolución del Caribe, mostrando un contacto oblicuo-transpresivo inicial en el Cretácico que posteriormente provoca una ruptura de la placa Caribe originando un movimiento horario en la parte oeste de la misma debido a su contacto oblicuo con Suramérica y hacia el este, luego de la ruptura, sigue un desplazamiento transpresivo contra Suramérica en dirección oeste-este.	<i>Topographic, bathymetric and seismic data were interpreted with the purpose of modeling the structural compartment of the southern margin of the Caribbean at different ages, in order to compare the results with the evolution models postulated in previous investigations. From the integration of the information, gravimetric maps and structural ceilings of the geological ages were generated, which illustrate the geometry and behavior of the structures throughout the evolution of the Caribbean, showing an initial oblique-transpressive contact in the Cretaceous that later causes a rupture of the Caribbean plate originating a time movement in the western part of the same due to its oblique contact with South America and to the east, after the break, follows a transpressive shift against South America in a west-east direction.</i>	<i>Interpretaram-se dados topográficos, batimétricos e sísmicos com o propósito de modelar o compartimento estrutural da margem meridional do Caribe a diferentes idades para, desta maneira, comparar os resultados com os modelos de evolução postulados em investigações prévias. Da integração da informação geraram-se mapas gravimétricos e de topos estruturais marcadores das idades geológicas, os quais ilustram a geometria e comportamento das estruturas ao longo da evolução do Caribe, mostrando um contato obliquo-transpressivo inicial no Cretáceo que posteriormente provoca uma ruptura da placa Caraíbas originando um movimento horário em parte-a oeste da mesma devido a seu contato obliquo com América do Sul e para o este, depois da ruptura, segue uma deslocação transpressivo contra América do Sul em direção oeste-este.</i>

**Palabras clave/Keywords/Palavras-chave:** Anomalia de Bouguer, Anomalia de Bouguer, Bouguer's Anomaly, eventos estratigráficos, evolución de la placa Caribe, evolução da placa Caraíbas, evolution of the Caribbean Plate, modelo estructural, modelo estrutural, stratigraphic events, structural model.

### Introducción

Los estudios de tectónica y geodinámica regional abarcan grandes extensiones geográficas que involucran una amplia variedad de estructuras y cuerpos de roca con geometrías, edades y reologías distintas, por lo que resulta conveniente utilizar métodos que permitan analizar con un alto nivel de resolución las variaciones laterales y verticales de estos cuerpos de roca sobre toda el área a considerar y con bajo costo durante la adquisición. La sísmica de reflexión suele ser uno de los métodos geofísicos por excelencia para este tipo de estudios, no obstante presenta el inconveniente que los costos de adquisición y procesamiento de los datos son elevados y normalmente se utilizan para realizar estudios a escala de cuencas. Por otra parte, la gravimetría es mucho más simple de adquirir y procesar y por ende sus costos son mucho menores, lo que la convierte en una herramienta ideal para estudios de alta resolución a gran escala regional, particularmente sobre cuencas oceánicas, grandes cordilleras montañosas y placas tectónicas. Aunado

a esto se dispone hoy día de variadas bases de datos gravimétricos satelitales que exhiben una excelente resolución sobre grandes áreas geográficas gracias a que combinan datos de tierra, mar, aire y satélite unificados en modelos gravimétricos estandarizados a una cota específica. Gracias a ello es factible desarrollar exploraciones de alta calidad sobre grandes áreas con propósitos de evaluación tectónica de cuencas y placas litosféricas, geodinámica e isostasia regional.

En consecuencia, el propósito de este artículo es analizar cualitativamente las anomalías gravimétricas observadas sobre la región meridional del Caribe e integrar esta información con datos sísmicos para generar un modelo conceptual de la configuración tectónica actual de este importante margen de placas.

### Marco tectónico regional

En el margen meridional de la placa Caribe se pueden distinguir varias provincias tectónicas principales (Figura 1): (1) la cuenca de Venezuela, (2) los arcos extintos

<sup>1</sup> Ing° Geof°, Esp. Profesor Instructor, Universidad Central de Venezuela (UCV), e-mail: ignacio.mederos@ucv.ve

<sup>2</sup> Ing° Geof°, MSc, Profesor Agnado, UCV, e-mail: antonio.ughi@ucv.ve

<sup>3</sup> Ing° Geof°, UCV, e-mail: dionisiogonzalez1391@gmail.com

de las antillas de Sotavento y de Aves, (3) las cuencas sedimentarias de Falcón, Bonaire, Los Roques, Cariaco y Grenada, (4) las cuencas antepaís de Maracaibo y Guárico y (5) los cinturones orogénicos del Sistema Montañoso del Caribe (Bellizzia, 1986; Pindell y Barrett, 1990; Audemard, 1993; Mann, 1999; Gorney *et al.*, 2007; Aitken *et al.*, 2011; Escalona y Mann, 2011).

#### Cuenca de Venezuela

El núcleo de la placa Caribe es corteza oceánica de edad Cretácica constituida por las cuencas de Colombia y Venezuela con arcos de islas y fragmentos continentales en sus márgenes (Aitken *et al.*, 2011). La cuenca de Venezuela posee un espesor anómalo de 17 a 20 km (Officer *et al.*, 1957; Fox y Heezen, 1975; Boynton *et al.*, 1979; Driscoll y Diebold, 1999). El perfil batimétrico de la cuenca de Venezuela es plano (Figura 1), con una suave deformación uniforme de 3 km de espesor, conformada por sedimentos pelágicos y clásticos provenientes del alto de Aves desde el este y del continente suramericano por el sur (Draper *et al.*, 1994; Driscoll y Diebold, 1999).

#### Antillas de Sotavento y alto de Aves

El alto de Aves (Figura 1) fue un arco

volcánico activo, perteneciente al gran arco del Caribe entre el Cretácico Tardío y el Paleoceno (Fox y Heezen, 1975; Pinet *et al.*, 1985; Bouyssen, 1988) conformado geológicamente, hacia el sur del alto de Aves, por granodioritas, diabasas, basaltos porfíricos y metabasaltos. Las edades radiométricas de esta zona datan del Cretácico Medio hasta el Paleoceno (Nagle, 1972; Fox y Heezen, 1975; Case *et al.*, 1984; Holcombe *et al.*, 1990) con sedimentos posiblemente derivados de Suramérica traídos desde el este a lo largo del margen pasivo suramericano (Pindell y Dewey, 1982) en el cual se encuentran los cinturones orogénicos producidos por la colisión Caribe-Suramérica.

El subsuelo hacia el borde suroeste de la placa Caribe posee 3 provincias en cuanto a basamento identificado a partir de registros de pozos compilados por González de Juana *et al.* (1980), Curet (1992) y Macellari (1995). Los pozos perforados en las islas de Sotavento (Curet, 1992) revelan un basamento compuesto por rocas ígneas metamorizadas pertenecientes al arco del Caribe del Cretácico, aunado a basaltos toleíticos y rocas volcánicas andesíticas de afinidad oceánica. Una segunda provincia de basamento con afinidad conti-

ental se encuentra en la península de la Guajira (rocas metamórficas Paleozoicas) (Gorney *et al.*, 2007).

#### Cuencas sedimentarias

En la zona de Falcón y la bahía de La Vela se encuentra una provincia diferente asociada al arreglo intra-arco del Cretácico Tardío, como por ejemplo, rocas ígneas metamorizadas sin afinidad oceánica. Las unidades sedimentarias de Falcón subyacen sobre basamento alóctono del Caribe. Este bloque fue emplazado durante el Paleoceno al Eoceno Temprano, en una etapa compresiva que afectó al oeste de Venezuela y consistió principalmente en depósitos de meta-sedimentos del Cretácico tardío relacionados con flysch (Audemard, 1991; Stephan, 1982). Por encima de esta sedimentación marina de basamento metamórfico asociada con la primera subsidencia extensional comenzó en la parte este de la cuenca la deposición de lutitas negras calcáreas del Eoceno Tardío (Renz, 1948). Durante el Oligoceno la extensión continuó y se extendió hacia el oeste, durante este tiempo la cuenca se expandió 36.000 km<sup>2</sup> cubriendo una ancha parte del norte venezolano, la cuenca tenía forma elongada y era limitada al sur y al oeste por áreas levantadas (plataforma de Dabajú-

ro), estaba parcialmente cerrada al norte por el alto de Paraguán y era continua al este con la cuenca profunda de Bonaire (González de Juana *et al.*, 1980). Hacia el Oligoceno, la distribución de litofacias estaba dominada por la geometría de la cuenca y subsecuentemente de más lutitas oscuras (sedimentos marinos) (Wheeler, 1963; Bezzada *et al.*, 2008). Las facies de aguas marinas del eje de la cuenca fueron intrusadas por cuerpos ígneos de composición basáltica alcalina, con edad de 22.9±0.9 Ma (Muessig, 1978) por lo que están en el límite Oligoceno-Mioceno; estas intrusiones podrían estar relacionadas con la formación incipiente de la corteza oceánica por el adelgazamiento de la corteza continental como resultado de un proceso extensivo (Muessig, 1984). Luego del Mioceno Medio, no ocurrió más sedimentación en la cuenca de Falcón y fue invertida por un régimen tectónico compresional que se transformó en una zona de relieve positivo conocida como el anticlinorio de Falcón (Audemard, 1993; 1998; 2001).

#### Cinturones orogénicos

El Sistema Montañoso del Caribe (Figura 1) es un complejo orográfico ubicado en la región norte costera de Venezuela donde forma un cinturón alargado con dirección este-oeste de topografía elevada y relieve accidentado. Este sistema comprende un conjunto de cinturones tectónicos que en superficie se extienden desde la cresta de Curazao al norte, hasta el corrimiento frontal de Guárico al sur y desde la transversal o deflexión de Barquisimeto en su extremo occidental, hasta la península de Araya-Paria en su extremo oriental (Bellizzia, 1986).

El Sistema Montañoso del Caribe está conformado, de norte a sur, por los cinturones tectónicos de 1) Cordillera de la Costa, 2) Caucaagua-El Tinaco, 3) Loma de Hierro-Paracotos, 4) Villa de Cura y 5) Piemontina (Beck, 1985; Stephan, 1985).

El cinturón tectónico de la Cordillera de la Costa es considerado un cuerpo para-alóctono y alóctono que representa junto con el cinturón de Caucaagua-El Tinaco el material proveniente del paleo-margen suramericano. Está constituido por un basamento granítico Precámbrico y por una cubierta volcánico-sedimentaria y sedimentaria del Mesozoico (González de Juana *et al.*, 1980). Según Deno (1951), Bellizzia (1972) y Beck (1985) los sedimentos Mesozoicos se depositaron cuando el terreno residía en un margen pasivo tipo Atlántico.

#### Datos gravimétricos

Los datos topográficos y batimétricos (Figura 2) utilizados para esta investigación fueron tomados del Centro Internacional para Modelos Gravimétricos Globales (International Center for Global Gravity Model-ICGEM, 2016). La ventana de estudio está comprendida entre las coordenadas 60° oeste a 74° oeste y 10° norte a 17° norte y consiste en una malla regularmente espaciada de 246.051 datos altimétricos basados en el modelo ETOPO-1 de un minuto de arco de resolución.

Como se puede observar en la figura 2, la región meridional del Caribe comprende una amplia variedad de accidentes geográficos que abarcan desde profundas cuencas oceánicas de más de 4000 m de profundidad hasta zonas de cordilleras montañosas como la sierra nevada de Santa Marta en Colombia o el Sistema Montañoso del

Caribe en Venezuela.

Sobre la cuenca de Venezuela se aprecian cuatro rasgos morfológicos distintivos: en primer lugar el este se observa el arco volcánico activo de las antillas menores, seguido más hacia el oeste por el alto de Aves; al sur, el arco de islas de las antillas de Sotavento que incluye al territorio insular venezolano y las antillas holandesas y finalmente, hacia el noroeste de la ventana en estudio se divide la cresta de Beata, la cual representa una prominente elevación topográfica sobre el lecho marino circundante. La base de datos de gravimetría fue tomada también del Centro Internacional para Modelos Gravimétricos Globales (International Center for Global Gravity Model-ICGEM, 2016) sobre las mismas coordenadas que los datos topográficos y batimétricos y consiste en una malla regularmente espaciada de 246.051 datos de anomalía de Aire Libre basada en el modelo EGM-2008 (Earth Gravity Model 2008). Los datos fueron descargados con un salto o espaciamiento entre estaciones de 0,02 y con corrección por mareas. Seguidamente se realizaron las reducciones necesarias hasta obtener la anomalía de Bouguer completa, esto es, se calculó la reducción de Bouguer con una densidad de reducción para la lámina de Bouguer de 2.670 kg/m<sup>3</sup> y una densidad para el agua de 1.027 kg/m<sup>3</sup>. Posteriormente se realizó la corrección topográfica, proceso que requiere utilizar dos Modelos Digitales de Elevación (Digital Elevation Model-DEM), uno local del tamaño del área en estudio más un radio de medio grado en todas las direcciones que debe tener un alto nivel de resolución y un segundo modelo regional más grande que el anterior que puede tener una resolución más baja y se expandió un grado más allá del área en estudio. Los DEM se descargaron en armónicos esféricos del mismo portal del ICGEM basados en el modelo ETOPO-1 con una malla del mismo grado y orden que el modelo EGM-2008 y una resolución de un minuto de arco.

La corrección topográfica se calcula utilizando una combinación de los métodos descritos por Nagy (1966a y 1966b) y Kane (1962). Para hacer los cálculos de la corrección el modelo digital de elevación se muestrea y centra en cada estación como una cuadrícula mallada. La corrección es calculada con base a la contribución de la zona cercana, intermedia y lejana. Para la zona cercana el algoritmo suma los efectos de cuatro secciones triangulares inclinadas que describen la superficie del terreno alrededor de la estación, para la zona intermedia, el efecto se calcula usando una aproximación con prismas cuadrados desarrollado por Nagy (1966a y 1966b). En la zona lejana se calcula la aproximación de un segmento anular según la descripción realizada por Kane (1962).

El mapa final de anomalía de Bouguer completa exhibe un ruido de alta frecuencia el cual se suprimió con un filtro de tipo gaussiano con una longitud de onda de 30 m. Sobre este mapa es que se realizarán los cálculos y análisis que se describen en las secciones siguientes.

#### Análisis cualitativo de los mapas gravimétricos

El mapa de anomalía de Aire Libre (Figura 3) exhibe la influencia la batimetría de la zona. Al norte de Venezuela, se observa una sucesión de máximos gravimétricos alineados en dirección este-oeste que corresponden con la ubicación de las antillas de Sotavento, las antillas holandesas y la isla de Margarita. Los valores de estos altos gravimétricos oscilan entre 100 y 177 mGal en las antillas de Sotavento, de 20 a 135 mGal para la sección de

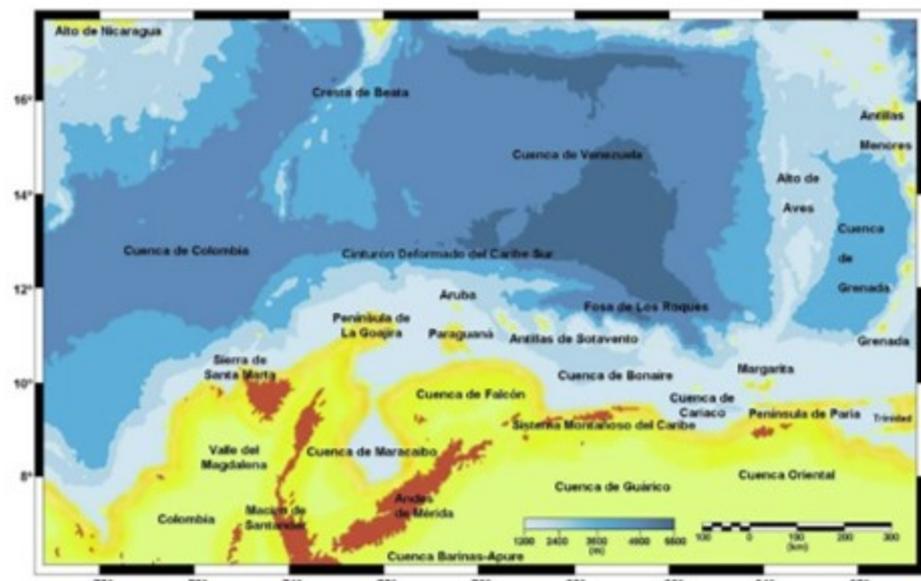


Figura 1. Mapa donde se ilustran las estructuras tectónicas del margen meridional del Caribe.

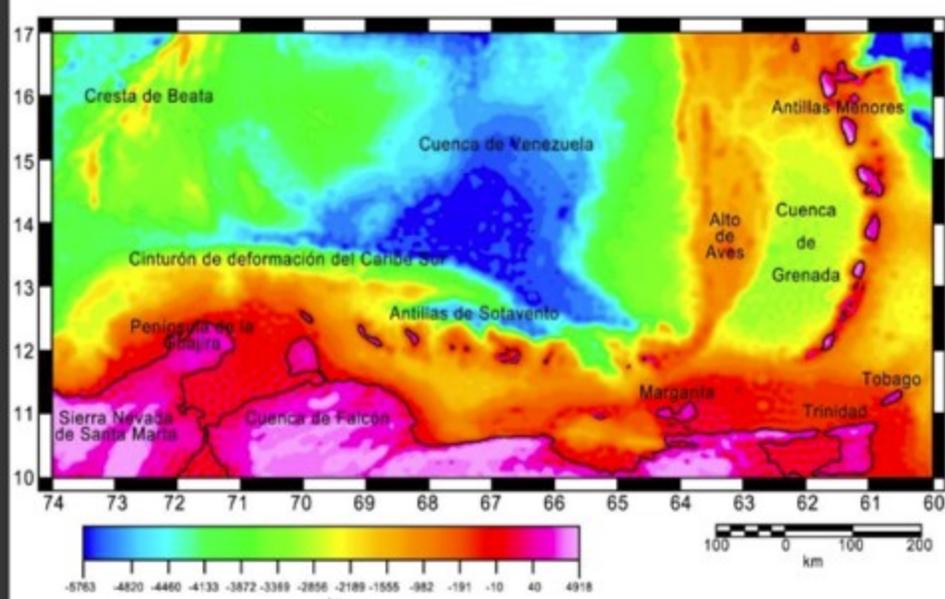


Figura 2. Mapa de batimetría/topografía del margen meridional del Caribe.

las islas Blanquilla y Los Hermanos y de 85 a 97 mGal para la isla de Margarita. Estos máximos se prolongan hacia el norte en dos vertientes, una más allá de la isla de Margarita que corresponde con las Antillas Menores y la otra directamente al norte de esta que corresponde con el alto de Aves. En todos estos casos la correspondencia entre la anomalía de Aire Libre y el mapa topográfico (Figura 2) es obvia; sin embargo, en la cuenca de Bonaire se observa una amplia anomalía de entre 17 y 67 mGal que se interconecta con las anomalías observadas sobre la isla Tortuga y el alto de Aves y que no posee una aparente correspondencia con la forma del piso oceánico en esa zona. Esta misma situación se observa entre la cuenca de Falcón y la sección oriental de las antillas holandesas (Curazao y Bonaire) y entre la península de la Guajira y Aruba. En todos estos casos las anomalías positivas poseen un rumbo aproximado N45E y parecen alinearse con una anomalía similar ubicada mucho más al norte sobre la cresta de Beata. Los rangos de anomalías también son similares: sobre la cuenca de Falcón se observan valores de 27 a 109 mGal, sobre la península de la Guajira de 30 a 96 mGal, en la península de Paraguaná

abarcando desde 33 a 66 mGal y en la cresta de Beata de 37 a 96 mGal. Al norte de las antillas de Sotavento se localizan los mínimos absolutos del mapa de anomalía de Aire Libre que corresponden con la fosa de Los Roques (-206 a -59 mGal) y el cinturón de deformación del Caribe sur (-125 a -56 mGal). Se observa además cómo el cañón de Los Roques en su extremo oriental interrumpe las anomalías positivas de las antillas de Sotavento entre las islas de La Orchila y La Blanquilla formando así dos regiones bien diferenciadas. La sierra nevada de Santa Marta exhibe los máximos absolutos de entre 100 y 670 mGal seguido de un pronunciado mínimo de -70 a -20 mGal que la separa de los altos valores observados sobre la península de la Guajira, para luego presentarse un nuevo mínimo de -40 a -18 mGal entre esta y la isla de Aruba. Finalmente, la placa oceánica del Caribe en la cuenca de Venezuela exhibe valores gravimétricos relativamente bajos (entre -43 y -30 mGal) tanto en la parte oriental como en la sección sur. El mapa de anomalía de Bouguer completa (Figura 4) exhibe una distribución y valores de anomalías gravimétricas marcadamente distintos a los del mapa de Aire Libre. Para este caso se evidencia una sig-

nificativa segmentación en la firma gravimétrica que aumenta su valor de sur a norte; es decir, que los valores mínimos absolutos se observan al sur sobre la mayor parte del territorio continental venezolano y parte del norte de Colombia, mientras que los valores máximos absolutos se observan al norte sobre la placa Caribe. El valor máximo absoluto de anomalía gravimétrica de 358 mGal está ubicado en la sección sur oriental de la placa Caribe; esta región de altos valores de anomalía de Bouguer posee una forma aproximadamente rectangular que abarca una amplia porción de la placa de aproximadamente 300 km en el eje latitudinal y 500 km en el eje longitudinal y un rango de anomalías gravimétricas entre 150 y 358 mGal. Al oeste de esta región, los valores de anomalía disminuyen a un rango de 179 a 230 mGal sobre una franja de entre 100 a 150 km de ancho con dirección N45°E correspondiente a la cresta de Beata, la cual está flanqueada tanto al noroeste como al sureste por máximos relativos 267 a 283 mGal. Esta firma gravimétrica claramente sugiere que las densidades de las rocas en la cresta de Beata son de una menor magnitud que aquellas que las circundan; generando en consecuencia, alto contraste gravimétrico que origina las anom-

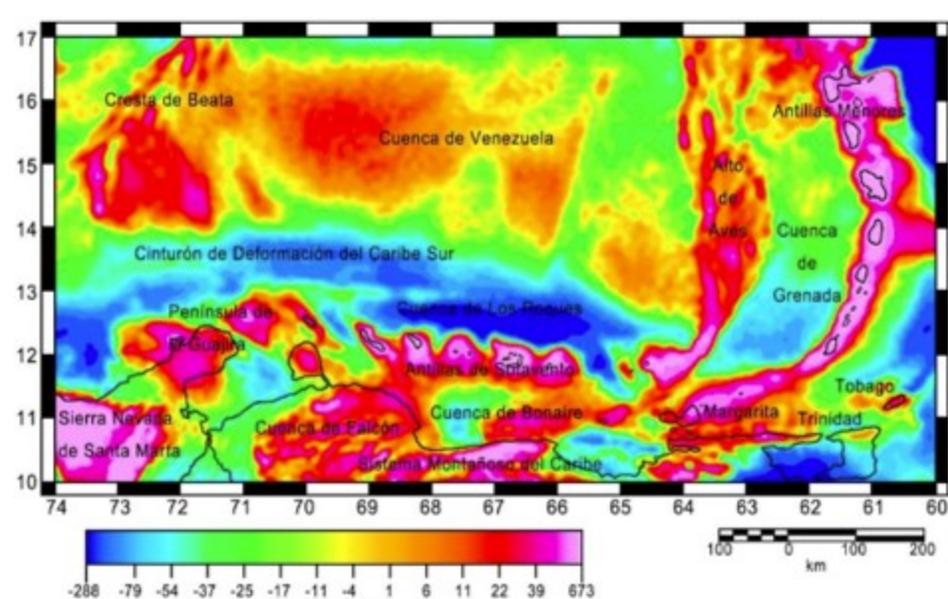


Figura 3. Mapa de anomalía de Aire Libre del margen meridional del Caribe.

alias descritas. El límite sur de la región de corteza propiamente oceánica, que es coincidente con los máximos valores gravimétricos, está marcado por una zona con geometría curva ubicada entre los 12° N y 13° N que delimita el cinturón de deformación del Caribe sur y resalta por el marcado contraste entre los valores de anomalía. Más al sur se observa una amplia zona que posee una orientación preferencial este-oeste con un rango de valores que oscila entre 47 y 190 mGal. Dentro de esta franja destacan un conjunto de anomalías tanto positivas como negativas que vale la pena mencionar; por ejemplo, al norte de las penínsulas de la Guajira y Paraguaná se observan mínimos gravimétricos significativos de -88 a -28 mGal y de -4 a 44 mGal, respectivamente; un poco más al norte, la pequeña isla de Aruba se encuentra en una zona con anomalías entre 49 y 59 mGal pero inmediatamente alejada a ella, sobre la cuenca de Aruba, los valores caen a un rango de entre -14 a -11 mGal. Siguiendo hacia el este las islas de Curazao y Bonaire se encuentran sobre máximos relativos de 148 y 171 mGal, respectivamente. Más hacia el este sobre la cadena de islas de las antillas de Sotavento se observa una alternancia de máximos de entre 153 a 190 mGal y mínimos relativos de entre 112 a 123 mGal. Estos valores demuestran que las antillas de Sotavento pueden ser subdivididas en dos segmentos: occidental y oriental, a partir del análisis de sus contrastes de densidades a pesar que petrologicamente se le considera una sola cadena de islas con la misma génesis y características. Por otra parte, la cuenca de Bonaire no exhibe contrastes significativos de densidad con un rango de anomalía entre 40 y 109 mGal. La isla de Margarita posee un rango entre 133 y 156 mGal y se interconecta con la sección sur de las Antillas Menores que poseen un rango entre 144 y 180 mGal, mientras que la sec-

ción norte es significativamente distinta con rangos entre 102 y 127 mGal. Considerando que la anomalía de Bouguer completa representa las variaciones laterales de contrastes de densidad entre los cuerpos de roca ubicados por debajo del nivel de referencia, se interpreta que la marcada diferenciación regional de las anomalías entre la zona norte, central y sur representa un cambio sustancial de las densidades de las rocas que constituyen estas secciones de litosfera. Bajo esta misma línea de pensamiento Ughi *et al.* (2013) definen a la sección sur (donde se observan los mínimos gravimétricos) como una litosfera típicamente continental, a la sección norte (donde se observan los máximos gravimétricos) como la zona de litosfera típicamente oceánica y entre ambas, la zona de litosfera transicional claramente diferenciada de las otras dos a partir de su firma gravimétrica característica y considerada como transicional por poseer un espesor anómalo mayor al de una corteza oceánica típica aún y cuando conserva una petrología similar. Este espesor anómalo tendería a disminuir la densidad y por ende a modificar el valor de la anomalía de Bouguer a pesar de poseer una composición similar a una litosfera oceánica.

**Datos sísmicos**  
Para esta investigación se utilizaron 27 líneas sísmicas 2D del proyecto BOLIVAR ("Broadband Ocean-Land Investigation of Venezuela and Antilles arc Region"; Levander *et al.*, 2006), con las cuales se procedió a interpretar los reflectores sísmicos y las fallas utilizando como base los resultados publicados por Gorney *et al.* (2007) Escalona y Mann (2011). Se diferenciaron cuatro secuencias de deposición que de base a tope son: (1) Cretácico, (2) Eoceno Tardío a Oligoceno, (3) Mioceno Temprano a Medio, y (4) Mioceno Tardío a Plioceno.

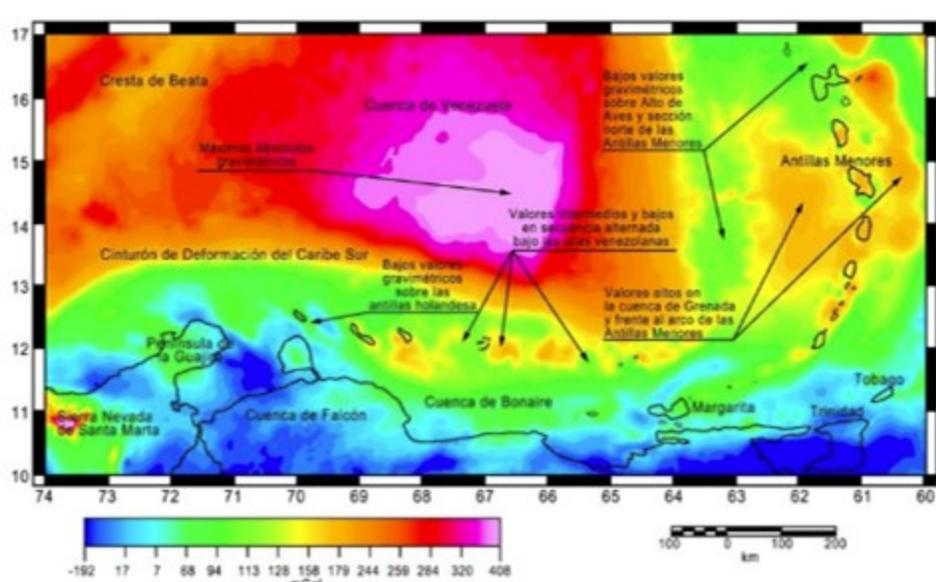


Figura 4. Mapa de anomalía de Bouguer del margen meridional del Caribe.

#### Interpretación sísmico - estructural

Esta etapa está organizada de forma cronológica desde los estratos más antiguos a los más recientes, por lo que se inicia con la interpretación estructural del Cretácico (Figura 5).

Se observa la presencia de fallas normales (líneas negras en la Figura 5) con sentido este-oeste, con mayor abundancia hacia la zona centro-oeste del área, estando este patrón relacionado con la colisión oblicua de la placa Caribe con Suramérica, lo que genera la flexión de la segunda al oeste de Venezuela en donde se puede detallar una estructura con buzamiento al norte muy marcado generando una fosa al norte de la cuenca de Venezuela en el sector donde se tiene el mayor contenido de fallas normales, también se puede identificar una discontinuidad en el patrón de buzamiento al norte en la zona central en donde se observa una estructura cóncava o horst entre dos grabenes estructurales, luego al observar la continuidad lateral de la placa Caribe hacia el este se encuentra un alto en la zona de Saint Vincent y Granada siendo coherente con la formación de las islas, pero en general se puede observar una estructura de horst al sur y graben al norte con su mayor expresión en el

oeste de Venezuela. Hacia el golfo de Paría la zona más al sureste del área se observa otro alto en donde se presentan fallas inversas (líneas rojas) enmarcadas entre dos sistemas de fallas normales, uno al sur y otro al norte.

Podemos enmarcar como conclusión del modelo estructural en el Cretácico, una estructura con buzamiento al norte, con desplazamiento oeste-este de las placas y un alto estructural en la zona central, posiblemente relacionado con la colisión oblicua entre las placas Caribe y Suramericana. También se evidencia un sistema de fallas predominantemente normal a lo largo del campo con sentido oeste-este y un conjunto de fallas inversas al sureste, debido posiblemente a la presencia del alto de las islas de Trinidad y Tobago.

Los estratos eocenos-oligocenos se encuentran ubicados entre los 4 y 4,8 segundos de las secciones sísmicas (Figura 6).

A este nivel se observa como característica primordial la presencia de fallas normales (líneas negras, Figura 6) con dirección oeste-este, siendo lo observado coincidente con lo indicado por Gomey *et al.* (2007), donde ellos describen la apertura norte-sur de 3 a 6 km de ancho que ocurre en la cuenca Falcón-Bonaire a lo largo de estas fallas y como resultado ini-

cial un fallamiento inverso (línea roja) en la cuenca de Venezuela y el fallamiento inverso enmarcado entre dos fallamientos normales, los cuales resaltan la presencia de la estructura de la isla de Trinidad y Tobago. En el Eoceno-Oligoceno se observa cómo se mantiene la forma y el sentido de buzamiento hacia el norte de la placa alcanzando las mayores profundidades hacia el sector oeste de la cuenca de Venezuela y un mínimo en el golfo de Venezuela, acentuándose aun más el levantamiento estructural en la zona central, posiblemente causante del fallamiento inverso al norte del área.

Se observa una tendencia de desplazamiento oeste-este de la placa Caribe con respecto a la placa Suramericana, pero se observa una mayor oblicuidad en la estructura central y más continuo con sentido oeste-este del levantamiento estructural presente en el centro hacia el este, siendo esto indicativo de una posible ruptura en el desplazamiento formando un desplazamiento de la placa Caribe en el este con continuidad hacia el este y otro hacia el oeste en donde la placa Caribe se incrusta en la placa Suramericana provocando esas deformaciones tan marcadas, sugiriendo este comportamiento una explicación factible al levantamiento hacia el golfo de Venezuela y una fo-

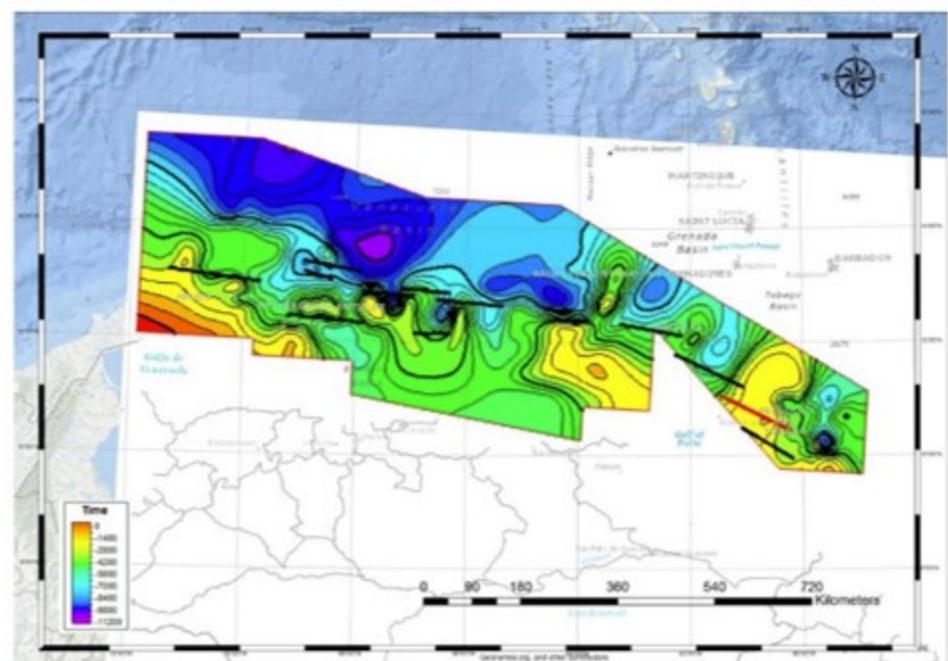


Figura 5. Mapa estructural del Cretácico.

sa muy marcada al norte.

Llegando a la superficie del Mioceno Temprano a medio (Figura 7) se observa un predominio del fallamiento normal (línea negra) pero aumenta el fallamiento inverso (línea roja) en la zona centro-oeste del área, donde se marca el mayor evento transgresivo.

La estructura mantiene el comportamiento de desplazamiento en dirección oeste-este, con buzamiento hacia el norte muy marcado en la zona de la cuenca de Venezuela en donde se encuentran los grabenes más profundos. También se detalla como el horst que se generó en el centro aumenta su cota y se puede observar con mayor resolución siguiendo el comportamiento de la zona verde oscura, en donde se distingue la ruptura de la placa por la colisión oblicua más marcada creando una división en el desplazamiento de la placa que se venía vislumbrando, obteniendo dos desplazamientos uno noroeste-sureste, con fallas normales indicativas de un régimen expansivo observado en la formación de la fosa (azul) cerca del levantamiento estructural que se genera en el centro en la cuenca de Venezuela y fallas inversas (línea roja) en los flancos del régimen expansivo, constituyendo un régimen compresivo.

Por el contrario, en el sector este hacia Trinidad se observa un desplazamiento más o menos continuo con dirección oeste-este hasta entrar en contacto con Saint Vincent y Granada y más al este con Trinidad y Tobago. El nivel correspondiente al Mioceno Tardío (Figura 8) muestra un buzamiento estructural hacia el norte manteniendo los mínimos al noroeste y los altos al suroeste y sureste.

Se observa el horst que se generó desde el Cretácico más marcado aun en la respuesta estructural y si segui-

mos como vimos en el Mioceno Temprano a Medio al comportamiento de la línea temporal verde, nos encontramos con la respuesta anterior más clara, en donde tenemos una tendencia noroeste-sureste esto corrobora el comportamiento horario de ese sector de la placa ya que va levantando la zona noroeste con el desplazamiento y la otra parte de la placa mantiene un desplazamiento oeste-este hasta entrar en contacto con Granada y las islas de Trinidad y Tobago.

En el Mioceno Tardío se observan nuevamente fallas normales propias de un régimen expansivo y hacia Trinidad queda un dominio total de un régimen expansivo desapareciendo las fallas inversas que se venían observando a lo largo de las edades anteriores. Como conclusión en esta etapa se puede decir que la placa sufre un giro en dirección horaria provocando una alineación de la deformación con direcciones noroeste-sureste y ascensos al noroeste de la placa, con fallas normales indicativo de un régimen expansivo nuevamente, que se encuentra en marcado dentro de un evento regresivo caracterizado por la degradación de las lutitas a arenas de grano fino.

#### Conclusiones

Se identificó un régimen expansivo desde el Cretácico hasta el Eoceno-Oligoceno caracterizado por fallas normales, seguido de un régimen compresivo en el Mioceno Temprano a medio en la zona central y posteriormente se retoma el régimen expansivo, siendo estos dos últimos cambios de regímenes de gran importancia para la ocurrencia de los eventos estratigráficos.

En cuanto al evento estructural se identifica entre la placa Caribe y la placa Suramericana un contacto oblicuo-transgresivo inicial en el Cretácico que posteriormente

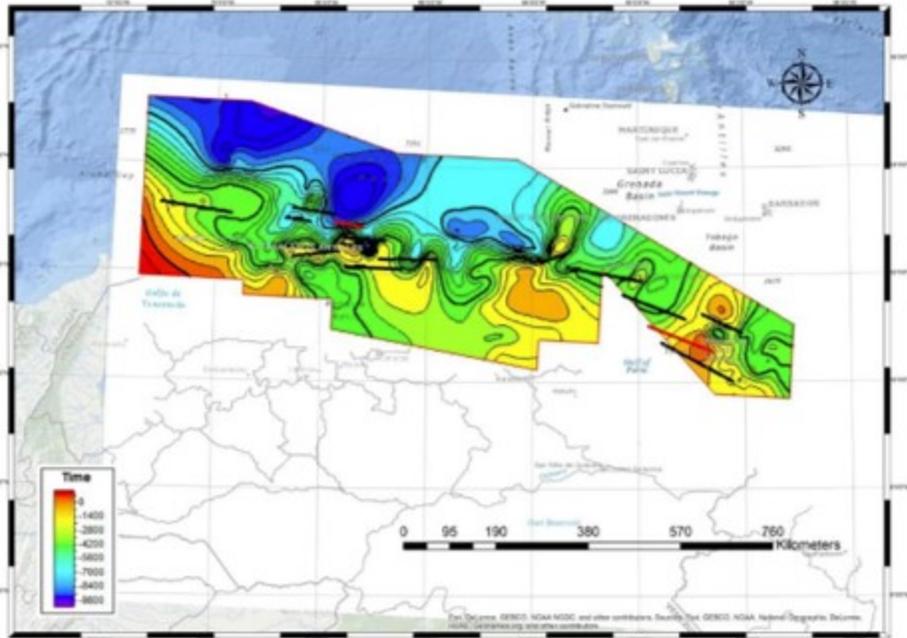


Figura 6. Mapa estructural del Eoceno-Oligoceno.

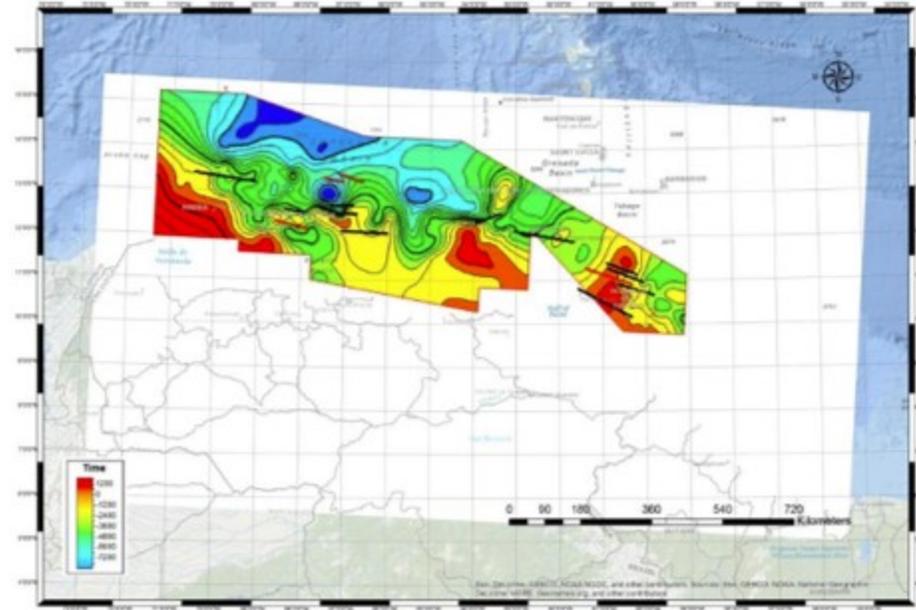


Figura 7. Mapa estructural del Mioceno Temprano-Medio.

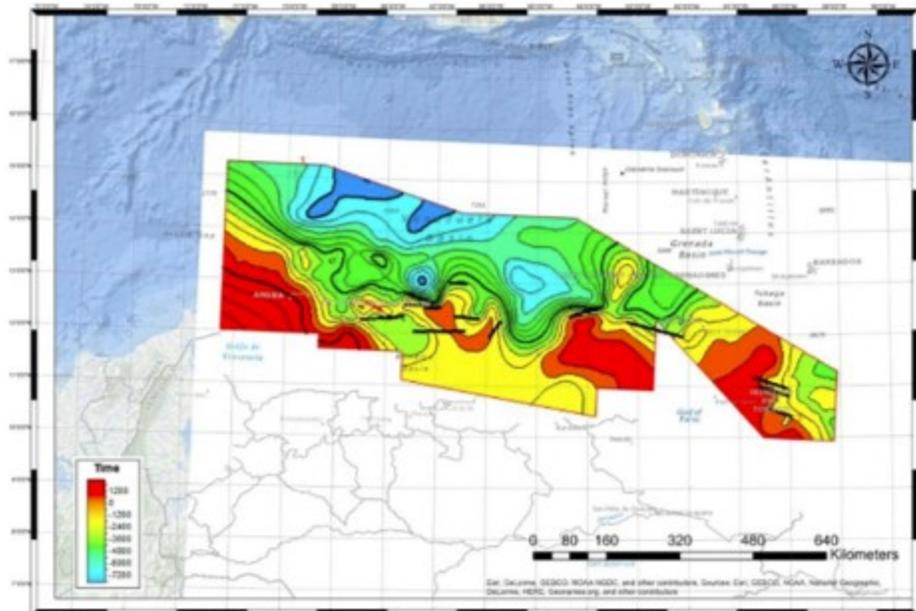


Figura 8. Mapa estructural del Mioceno Tardío.

provoca una ruptura de la placa Caribe originando un movimiento horario en la parte oeste debido a su contacto oblicuo con Suramérica, el cual queda demostrado por el levantamiento que se va generando a lo largo de las edades del Mioceno hacia el noroeste y la otra parte de la placa que queda luego de la ruptura se sigue desplazando transpresivamente contra Suramérica en dirección oeste-este hasta llegar a los altos de Granada y de las isla de Trinidad y Tobago.

De Trinidad y Tobago se puede mencionar una característica que varía ya en el Mioceno Tardío en donde las fallas inversas que se observan en la isla a lo largo del Cretácico hasta el Mioceno Medio, que luego se revierte a fallamiento normal en el Mioceno Tardío, es decir, que en Trinidad y Tobago se observa un evento compresivo-expansivo que luego se convierte en solo compresivo a lo largo de su formación.

#### Referencias

Aitken, T., Mann, P., Escalona, A. and Christenson, G. (2011). Evolution of the Grenada and Tobago basins and implications for arc migra-

tion. *Marine and Petroleum Geology* 28(1):235-258.

Audemard, F. E. (1991). *Tectonics of western of Venezuela*. Ph.D. thesis, Rice University, Texas, 245 pp.

Audemard, F. A. (1993). *Néotectonique, sismotectonique et aléa sismique du nord-ouest du Vénézuéla (système de failles d'Oca-Ancón)*. Ph.D. thesis, Université Montpellier II, 369 pp.

Audemard, F. A. (1998). *Evolution Géodynamique de la Facade Nord Sud-américaine: Nouveaux apports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Vénézuéla*. Proceedings XIV Caribbean Geological Conference, Trinidad, 1995 2:327-340.

Audemard, F. A. (2001). Quaternary tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcón Basin, northwestern Venezuela. *Journal of Structural Geology* 23:431-453.

Beck, C. (1985). *Las naps de Aragua-Cadena Caribe Central y la historia Mesozoica del margen sur del Caribe a lo largo del meridiano de Caracas*. Memoir, Symposium Géodynamique des Ca-

raibes, Paris 541-551.

Bellizzia, G. A. (1972). *Sistema Montañoso del Caribe, borde sur de la placa Caribe ¿es una cordillera alóctona?*. Memorias 6<sup>a</sup> Conferencia Geológica del Caribe, Margarita, Venezuela 247-258.

Bellizzia, G. A. (1986). *Sistema Montañoso del Caribe, una cordillera alóctona en la parte norte de América del Sur*. Sociedad Venezolana de Geólogos, Memorias VI Congreso Geológico Venezolano 10:6657-6836.

Bezada, M., Schmitz, M., Jácome, M.I., Rodríguez, J., Audemard, F. and Izarra, C. (2008). Crustal structure in the Falcón Basin area, northwestern Venezuela, from seismic and gravimetric evidence. *Journal of Geodynamics* 45:191-200.

Boynton, C. H., Westbrook, G. K., Bott, M. H. and Long, R. E. (1979). A seismic refraction investigation of crustal structure beneath the Lesser Antilles island arc. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 58:371-393.

Bouysse, P. (1988). Opening of the Grenada back-arc basin and evo-

- lution of the Caribbean plate during the Mesozoic and early Paleogene. *Tectonophysics* 149:121-143.
- Case, J. E., Holcombe, T. L. and Martin, R. G. (1984). *Map of geologic provinces in the Caribbean region* - In: Bonini, W. and Hargraves, R. (eds.), *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, GSA Memoir, vol. 162. Geological Society of America, Boulder, CO 1-30 pp.
- Curet, E. (1992). Stratigraphy and evolution of the Tertiary Aruba basin. *Journal of Petroleum Geology* 15:3.
- Dengo, G. (1952). Geología de la región de Caracas. *Boletín de Geología*, Caracas 1(1): 39-115.
- Draper, G., Donovan, S. K. and Jackson, T. A. (1994). *Geologic provinces of the Caribbean region* - In: Donovan, S. K. and Jackson, T. A. (eds.), *Caribbean Geology*, The University of West Indies Publishers Association (UWIPA), Kingston, Jamaica, 3-12.
- Driscoll, N. W. and Diebold, J. B. (1999). *Tectonic and stratigraphic development of the eastern Caribbean: new constraints from multichannel seismic data* - In: Mann, P. (ed.), *Caribbean Basins, Sedimentary Basins of the World*, Elsevier, Amsterdam, 591-626.
- Escalona, A. and Mann, P. (2011). Tectonics, basin subsidence mechanism, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone. *Marine and Petroleum Geology*, 28(1): 8-39.
- Fox, P. J. and Heezen, B. C. (1975). *Geology of the Caribbean crust* - In: Nairne, A. & Stehli, F. G. (eds.), *The Ocean Basins and Margins*, Plenum, New York, 421-466.
- González de Juana, C., Iturralde, J. and Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Ediciones FONINVES, Caracas, Venezuela, 1031 pp.
- Gorney, D., Escalona, A., Mann, P. and Magnani, M.B. (2007). Chronology of Cenozoic tectonic events in western Venezuela and the Leeward Antilles based on integration of offshore seismic reflection data and on-land geology. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91(5): 653-684.
- Holcombe, T. L., Ladd, J. W., Westbrook, G., Edgar, N. T. and Bowland, C. L. (1990). *Caribbean marine geology; ridges and basin of the plate interior* - In: Dengo, G., Case, J.E. (eds.), *The Caribbean Region, the Geology of North America*. Geological Society of America, Boulder, CO, 231-260.
- Kane, M. F. (1962). A Comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics*, 27(4):455-462.
- Levander, A., Schmitz, M., Avé-Lallemant, H., Zell, C., Sawyer, D., Magnani, M.B., Mann, P., Christeson, G., Wright, J., Pavlis, G. and Pindell, J. (2006). Evolution of the Southern Caribbean plate boundary. *EOS*, 87(9):97-100.
- Macellari, C. (1995). *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia* - In: Tankard, A., Suarez, S., Welsink, H. (eds.), *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62:757-780.
- Mann, P. (1999). *Caribbean sedimentary basins: classification and tectonic setting from Jurassic to present* - In: Mann, P. (ed.), *Caribbean Basins, Sedimentary Basins of the World*, vol. 4. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 3-31.
- Muessig, K. (1978). *The central Falcon igneous suite, Venezuela: Alkaline basaltic intrusions of the Oligocene - Miocene age*. *Geologie en Mijnbouw* 57:261-266.
- Muessig, K. (1984). *Structure and Cenozoic tectonics of the Falcon Basin, Venezuela, and adjacent areas* - In: Tankard, A., Suarez, S. and Welsink, H. (eds.), *Petroleum basins of South America: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62:217-230*.
- Nagle, F. (1972). *Rocks from seamounts and escarpments on the Aves Ridge* - In: Transactions of the Sixth Caribbean Geological Conference, Queens College Press, Flushing, NY, 409-413.
- Nagy, D. (1966a). The prism method for terrain corrections using digital computers. *Pure Applied Geophysics*, 63:31-39.
- Nagy, D. (1966b). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31:362-371.
- Officer, C. B., Ewing, J. I., Edwards, R. S. and Johnson, H. R. (1957). *Geophysical Investigations in the Eastern Caribbean: Venezuela Basin, Antilles Island Arc and Puerto Rico Trench*. Geological Society of America Bulletin 68:359-378.
- Ostos, M. (1990). Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basado en datos geoquímicos. *Revista Geos*, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 30:1-294.
- Pindell, J. and Dewey, J. (1982). Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean region. *Tectonics* 1(2):179-212.
- Pindell, J. and Barrett, S. (1990). *Geological evolution of the Caribbean region: a plate tectonic perspective* - In: Dengo, G. & Case, J. (eds.), *The Caribbean Region*. The Geology of North America, 405-432.
- Pinet, B., Lajat, D., LeQuelléc, P. and Bouysse, P. (1985). *Structure of Aves Ridge and Grenada basin from multi-channel seismic data* - In: Mascle, A. (ed.), *Symposium Géodynamique des Caraïbes*. Technip, Paris, 53-64.
- Renzi, H. H. (1948). *Stratigraphy and fauna of the Agua Salada Group, State of Falcon, Venezuela*. Geological Society of America, Memoir 32, 219 pp.
- Stephan J.F. (1982). *Evolution géodynamique du domaine Caraïbe, Andes et Chaine Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla)* (PhD Thesis). University Pierre et Marie Curie, Paris.
- Stephan J.F. (1985). *Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla)*. *Evolution géodynamique*. Proceedings of Symposium Géodynamique des Caraïbes, Paris, 505-529 pp.
- Ughi, A., González, D. y Toloza, A. (2013). Delimitación del margen de placa entre Suramérica y el Caribe al norte de Venezuela mediante el realzado de la anomalía gravimétrica. *Geoacta*, 38(2):140-152.
- Wheeler, C. (1963). *Oligocene and Lower Miocene stratigraphy of western and northwestern Falcon Basin, Venezuela*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 47(1):35-68.