

MODELADO CINEMÁTICO DE UN TRANSECTO DESDE LA CUENCA DE MARACAIBO HASTA LA CUENCA BARINAS-APURE

NINOSKA AMUNDARAY¹, OSWALDO GUZMÁN^{1,2,*}, JOSÉ LARA³, CORINA CAMPOS², ISANDRA ANGEL¹

¹Universidad Simón Bolívar. Departamento de Ciencias de La Tierra. Caracas, Venezuela.

²Grupo de Investigación en Ciencias de La Tierra y Clima. Universidad Regional Amazónica Ikiam. Tena, Ecuador.

³Petróleos de Venezuela (PDVSA), Gerencia de Exploración. Venezuela.

*Autor por correspondencia

e-mails: ninoskadvall@gmail.com, oswaldo.guzman@ikiam.edu.ec, joselara112@gmail.com, corina.campos@ikiam.edu.ec, isandrangel@usb.ve

Fecha

Fecha

RESUMEN

Los principales elementos estructurales que hoy en día se identifican en el Occidente Venezolano son: la Cuenca de Maracaibo, la Cuenca de Barinas-Apure y los Andes de Mérida. A diferencia de las cuencas, la estructura interna de los Andes de Mérida es un tema de constante debate, debido a la compleja evolución tectónica del área. De acuerdo a hipótesis de estudios geoquímicos, un porcentaje del hidrocarburo que se produce hoy en día en los campos de Barinas fue generado por rocas ubicadas en la actual Cuenca de Maracaibo, y por lo tanto, su expulsión y migración debió ocurrir previa al levantamiento de los Andes de Mérida. El objetivo de este trabajo consistió en realizar un modelo cinemático de un transecto desde la Cuenca de Maracaibo hasta la Cuenca Barinas-Apure, coherente con los datos y resultados de investigaciones recientes, que permitiera evaluar la viabilidad geológica del modelo estructural propuesto. El modelo estructural fue construido a partir de la integración de dos secciones sísmicas balanceadas disponibles para los flancos de los Andes de Mérida y la información de geología de superficie. El modelo fue retrodeformado y modelado cinemáticamente hacia adelante hasta alcanzar la configuración actual. El modelado cinemático resultante reproduce la evolución del transecto a través de ocho estadios de deformación, desde el Eoceno Medio hasta el Reciente, planteándose el desarrollo de la cordillera como una estructura de piel gruesa opuesta a la dirección del esfuerzo principal. El modelo permite estimar un acortamiento de 30 km que corresponde a un 15% de la longitud inicial del transecto.

Palabras Clave: Andes de Mérida, Cuenca de Maracaibo, Cuenca de Barinas-Apure, Modelado Cinemático, Pulsos de Generación, Hidrocarburo.

KINEMATIC FORWARD MODELLING OF A TRANSECT FROM THE MARACAIBO BASIN TO THE BARINAS-APURE BASIN

ABSTRACT

The principal structural features in western Venezuela are the Maracaibo Basin, the Barinas-Apure Basin and the Mérida Andes. Though the inner structure of both basin is well defined, the structure at depth of the Mérida Andes is a matter of constant debate due the complexity of the area and the lack of subsurface data. Hypothesis of geochemical studies in the area propose that part of the hydrocarbon produce nowadays in Barinas was generated from rocks that are now in the Maracaibo Basin, suggesting that the processes of generation and migration of hydrocarbon occurred in a stage previous of the Mérida Andes uplift. The purpose of this work was the proposal a kinematic structural model of a transect from the Maracaibo Basin to the Barinas-Apure Basin, coherently with the data and results of recent investigations, considering the geological viability. The structural model was built from the integration of two balanced seismic sections available for the flanks of the Andes of Merida and surface geology information. The model was restored and forward modelled until the actual structural configuration of the Andes was reached. In our kinematic forward model the evolution of the study area is divided in eight episodes, from Middle Eocene to Holocene. We propose the uplift of the Mérida Andes as a result of thick-skinned deformation opposite to the direction of principal stress. The value of shortening for the area was estimated around 30 km, which represents a 15% of the initial distance.

Keywords: Mérida Andes, Maracaibo and Barinas-Apure basins, Kinematic, Forward modelling, Hydrocarbon generation and migration.

INTRODUCCIÓN

La actual configuración fisiográfica del área occidental de Venezuela se compone de la presencia de tres grandes estructuras geológicas, estas son: la Cuenca de Maracaibo, la Cuenca de Barinas-Apure y los Andes de Mérida. Esta última constituye una cadena montañosa formada como resultado indirecto de una compleja interacción entre las placas Sudamericana, Nazca y Caribe (Kellogg y Bonini, 1982; Pindell y Barrett, 1990).

Debido a la complejidad de la estructura interna de los Andes de Mérida y la escasez de datos del subsuelo, existe una alta incertidumbre y diferencias en las interpretaciones de la geometría y conexión de las fallas en profundidad de los modelos estructurales planteados para describir la cordillera. Estos modelos se dividen en dos corrientes principales, aquellos que consideran su desarrollo como una estructura simétrica (Rod, 1956; Shagam, 1972; Stéphan, 1982) y otros que se inclinan a la no asimetría (Colletta y otros., 1997; Oldow y otros, 1990; Audemard y Audemard, 2002; Monod, Dhont y Hervouët, 2010).

Indiferentemente de la estructura cortical de los Andes de Mérida, su ubicación geográfica y evolución geológica han impactado en el dinamismo de las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure, y muy probablemente han influido en los procesos de generación y migración de hidrocarburos, como es propuesto por estudios geoquímicos realizados en el área (Chigné y otros, 1996; Cordero y otros, 2006). Estos estudios postulan que un porcentaje alto del crudo presente en los campos de Barinas fue generado por rocas ubicadas en la actualidad en la Cuenca de Maracaibo, y por lo tanto, su expulsión y migración ocurrió previo al levantamiento de los Andes de Mérida, cuando las cuencas previamente mencionadas estaban conectadas.

Esta hipótesis sólo está basada en interpretaciones de datos geoquímicos, por lo que existe la necesidad de evaluar su viabilidad geológica a través de un modelado numérico que contribuya a la comprensión de los procesos de expulsión, migración y acumulación de los hidrocarburos en el área. Por tal razón, en el presente trabajo se pretende integrar datos geológicos y geofísicos, tanto de superficie como de subsuelo, con la finalidad de proponer un modelo cinemático de un transecto desde la Cuenca de Maracaibo hasta la Cuenca Barinas-Apure que sirva de punto de partida para un eventual modelado termal de la zona.

MARCO GEOLÓGICO

Configuración General del Área de Estudio

Los Andes de Mérida constituyen un sistema montañoso asimétrico y de rumbo NE-SO, situado en la parte norte de la placa Sudamericana (Colletta y otros, 1997), extendiéndose 400 km desde la frontera entre Colombia y Venezuela hasta el sur de Barquisimeto. El origen de esta cadena montañosa se atribuye al resultado indirecto de una interacción compleja durante el Cenozoico entre las placas Sudamericana, Nazca y Caribe (e.g., Kellogg y Bonini, 1982; Pindell y Barrett, 1990, Audemard y Audemard, 2002; Bermúdez, 2009; Bermúdez, Van der Beek y Bernet, 2011), y la rotación y traslación del bloque continental de Maracaibo (e.g. Aleman y Ramos, 2000; Taboada y otros, 2000; Audemard y Audemard, 2002). Los Andes de Mérida constituyen una zona compleja de límite de placas, donde la placa Caribe se mueve en dirección oeste a este en relación a la Placa Sudamericana. Este límite de placa no es netamente del tipo dextral (Soulas, 1986; Beltrán, 1994), ya que se reconoce una amplia zona de transpresión de poco más de 100 km.

La configuración geodinámica y estructural de los Andes de Mérida se encuentra controlada por: i) el movimiento de las placas tectónicas, ii) la existencia de varios sistemas de fallas rumbo-deslizantes, entre los que destaca la Falla de Boconó, y iii) por las fallas de corrimiento que se encuentran a ambos flancos de la cadena montañosa. Los principales sistemas fallas en los Andes de Mérida tienen un rumbo general hacia el NE, paralelo a la Falla de Boconó y en la dirección de los grabenes que se formaron durante el Jurásico Tardío (Maze, 1984; Ostos y Sisson, 2005), demostrando que gran parte de la arquitectura de la cadena es mayormente heredada de eventos previos (Audemard, 1993; Colletta y otros, 1997).

El área de estudio de este trabajo corresponde a un transecto andino con dirección NO-SE de aproximadamente 170 km en el oeste de Venezuela, extendiéndose desde la Cuenca de Maracaibo (noroeste) hasta la Cuenca Barinas-Apure (suroeste) y atravesando perpendicularmente parte la cadena montañosa de los Andes de Mérida (**figura 1**). En esta área es reconocida la alta complejidad estructural, consecuencia de los diversos episodios tectónicos a la que ha estado expuesta. En el presente trabajo se simplificó la exhumación de los Andes de Mérida, en la zona del transecto modelado, por medio del movimiento de las fallas principales de Valera, Pampán, Jajó, Boconó y el Retrocorrimiento de Cerro Azul (**figura 2**).

Estas fueron definidas a partir de información de geología de superficie y dos secciones sísmicas balanceadas y reconstruidas en los flancos del orógeno andino por proyectos exploratorios de PDVSA (Delgado y otros, 2014; Santiago y otros, 2014).

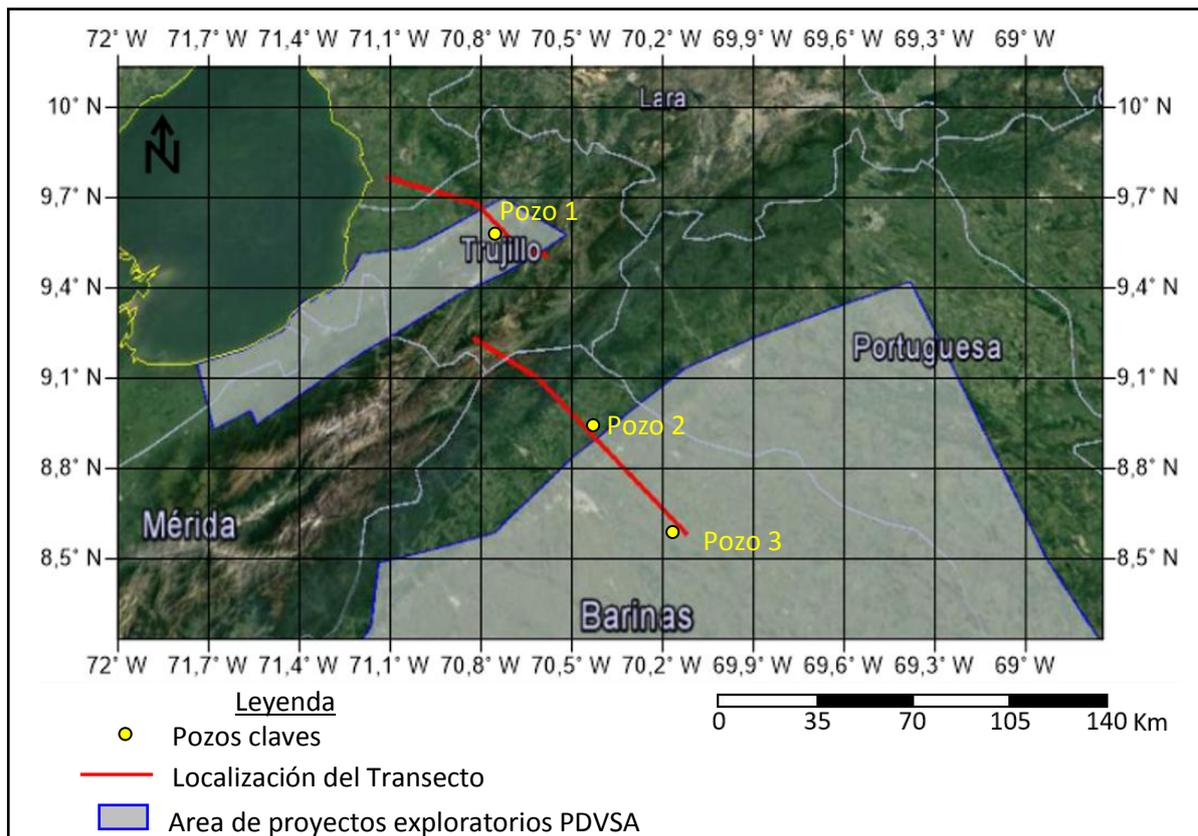


Figura 1. Localización de la zona de estudio sobre una imagen satelital. La ubicación y dirección del transecto a estudiar se muestran con dos líneas gruesas rojas. Los pozos con datos de interés para el modelado se muestran con círculos amarillos. Las áreas sombreadas de blancos representan los polígonos de los proyectos de investigación de PDVSA (Delgado y otros, 2014; Santiago y otros, 2014).

En general, las fallas presentes a lo largo del transecto se originan desde el basamento, deformando y colocando en contacto secuencias antiguas junto a otras más jóvenes. La Falla de Boconó representa el principal sistema de fallas de los Andes de Mérida, la cual es definida hoy en día como un sistema transcurrente dextral (Rod, 1956; Cluff y Hansen, 1969, Audemard y Audemard, 2002) con orientación NE-SO y una extensión de 500 km aproximadamente. Dentro de la zona de estudio la Falla de Boconó se localiza en el centro del transecto.

La Falla de Valera ubicada en el extremo NO del transecto es una falla transcurrente sinistral, que se encuentra interpretada en profundidad como una falla reactivada inversa tras un comportamiento normal durante la época del Eoceno, momento para el cual controla los depósitos en el área (Restrepo y Toussaint, 1978; Colletta y otros, 1997). Las fallas más cercanas a la Falla de Valera son las fallas de Pampán y Jajó, ambas son consideradas como fallas reactivadas, tienen un rumbo NE-SO y producen el cabalgamiento de rocas de edad Precámbrica sobre depósitos más jóvenes.

El Retrocorrimiento de Cerro Azul es un elemento tectónico localizado en el extremo SE del transecto, tiene una orientación NE de aproximadamente 20

km de largo y 5 km de ancho, y su nombre se debe a la falla inversa que controla el evento principal de levantamiento y deformación de la estructura, cuyo movimiento se relaciona a la formación de los Andes de Mérida (Schubert, 1969).

Los Andes de Mérida han absorbido una cantidad significativa de desplazamiento lateral a lo largo de fallas de basamento preexistentes, siendo la principal la Falla de Boconó (Bermúdez, 2009). Las estimaciones del desplazamiento total de la Falla de Boconó varían entre 9 km, estimados de la longitud de la cuenca de tracción de Las Gonzalez (Schubert, Esteves y Henneberg, 1993), 30 km estimados a partir de datos gravimétricos (Audemard y Audemard, 2002; Audemard, Carrillo y Beck, 2007) y 80 km estimados a partir de la edad del emplazamiento de alóctono del Caribe (Stéphan, 1982). El acortamiento estimado para los Andes de Mérida varía entre 15 a 60 km (Colletta y otros, 1997; Audemard y Audemard, 2002; Duerto, Escalona y Mann, 2006). Estos valores dependen fuertemente en el buzamiento de los corrimientos y fallas de basamento considerados en los modelos estructurales de los Andes de Mérida, los cuales presentan una alta incertidumbre en profundidad.

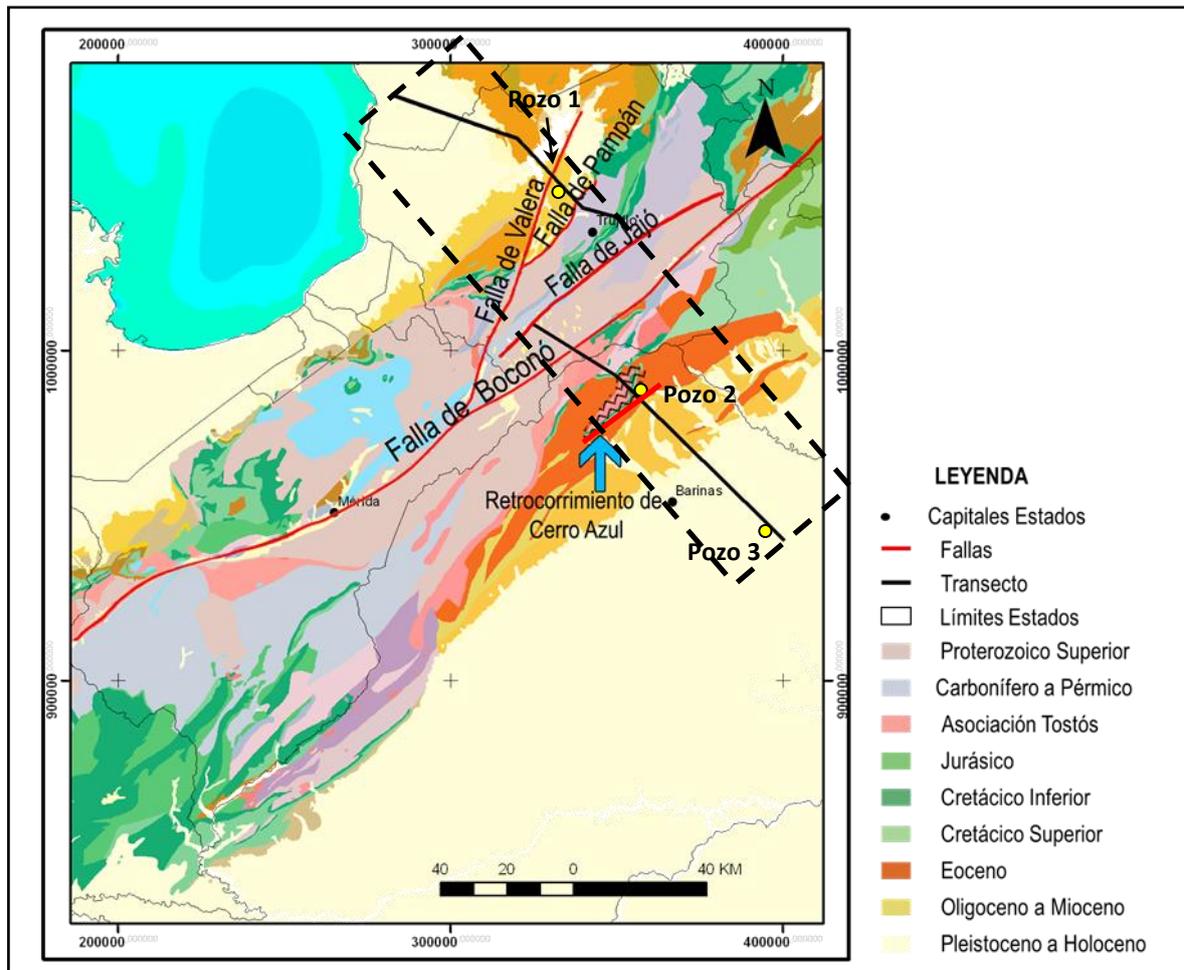


Figura 2. Mapa geológica de la zona de estudio (adaptado de Hackley y otros, 2005). La zona de estudio se muestra con un rectángulo de líneas negras discontinuas. Las fallas principales que afloran en superficie y que son utilizadas en este estudio son identificadas con líneas rojas. El transecto analizado se muestra con líneas negras. Los pozos con datos de interés para el modelado se muestran con círculos amarillos.

Evolución Tectonoestratigráfica

En general, se puede sintetizar la evolución de la zona de estudio en tres grandes episodios tectonoestratigráficos: una fase de Apertura Continental en el Jurásico, una época de margen pasivo durante el Cretácico y un periodo de margen activo durante el Cenozoico. Este último se encuentra subdividido en un tiempo para el cual el área general se comportó como una sola cuenca de antepaís debido al levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia en el Paleoceno (Cooper y otros, 1995; Villamil, 1999; Bayona y otros, 2007) y un momento posterior en el cual la tectónica compresiva, causada por la exhumación de los Andes de Mérida en el Mioceno (Audemard, 1993; De Toni y Kellogg, 1993; Colletta y otros, 1997) separó la región en la Cuenca de Maracaibo (intramontaña) y la Cuenca de Barinas-Apure (antepaís).

Los tres grandes episodios tectonoestratigráficos mencionados producen un arreglo litoestratigráfico que varía arealmente a lo largo de los Andes de Mérida y las cuencas de Maracaibo y Barinas-

Apure. En el presente estudio se utilizó las unidades depositacionales (UD) definidas como tectonosecuencias por Santiago y otros (2014) (figura 3). En dicho estudio, cada unidad depositacional agrupa diferentes unidades litoestratigráficas, las cuales fueron depositadas bajo un mismo evento tectonoestratigráfico.

La Unidad Depositacional II (UDII), contiene los depósitos con prospectividad de roca madre en las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure. Estos depósitos reciben el nombre de Fm. La Luna en el norte del transecto (Blazer, 1979; Stauffer y Betoret, 1979) y Fm. Navay en el sur del transecto (Chigné, 1985; Loaiza y Hernández, 1990). Ambas formaciones se depositarían en la época de margen pasivo durante el Cretácico (Valdés y otros, 1992; Parnaud y otros, 1994; Audemard y otros, 2002) durante el cual un evento de transgresión regional favoreció un ambiente anóxico a subóxico, que benefició la distribución de rocas con características marina y mixta.

Estudios basados en datos geoquímicos, han propuesto que las secuencias con prospectividad de

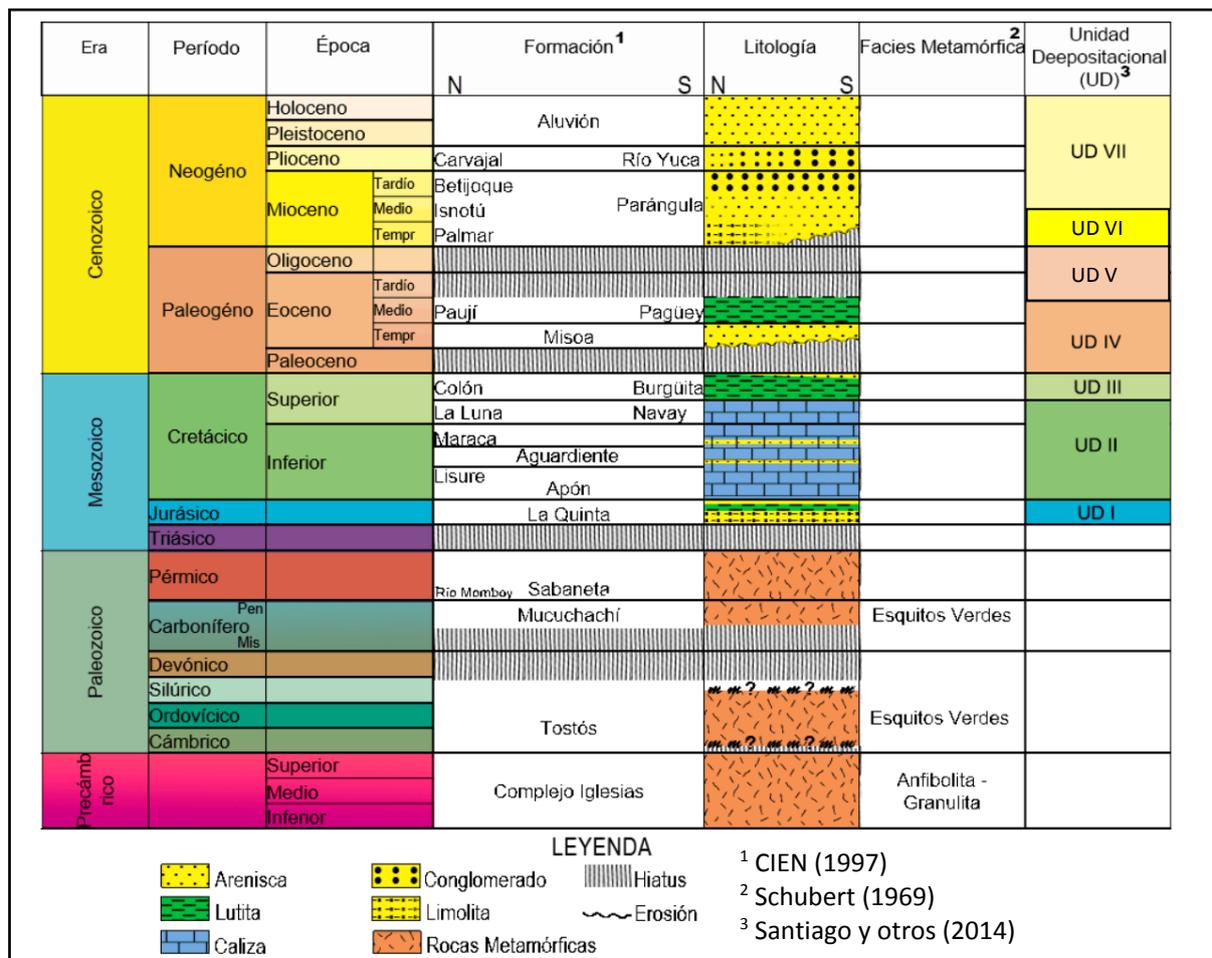


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada del área de estudio (adaptado del CIEN, 1997). También se muestran las facies metamórficas propuestas por Schubert (1969), para las unidades paleozoicas y precámbricas de los Andes de Mérida y las unidades depositacionales de Santiago y otros (2014).

roca madre, en el área de estudio, experimentaron dos pulsos de generación-expulsión de crudo, consecuencia de dos periodos de rápida subsidencia (Talukdar, Gallango y Ruggiero, 1985). El primer episodio sucedió durante el Paleógeno, ocasionado por el emplazamiento de un frente de deformación conocido como las Napas de Lara, producto de la colisión entre la placa del Caribe y la Suramericana; y el segundo pulso sucedió debido a la exhumación de la cadena de los Andes de Mérida en el Neógeno. Este último evento se supone bloquearía las vías de migración previas, a través de las cuales parte del hidrocarburo originado por las rocas generadoras en la actual Cuenca de Maracaibo migraría a los campos de Barinas (Chigné y otros, 1996; Cordero y otros, 2006; Delgado, y otros, 2014; Santiago, y otros, 2014).

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se dividió en dos fases principales: integración de datos disponibles en el área y elaboración del modelo cinemático.

Integración de datos

Primeramente, se recolectó toda información disponible para el área de estudio, en donde es importante destacar que en la zona central del transecto (área en la que se localizan los Andes de Mérida), no existe información de datos de pozo y sísmica de reflexión que permitan realizar interpretaciones y estimaciones de espesores erosionados. Para solventar esta falta de información se realizaron mapas con datos extrapolados de las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure en el software *ArcGIS* versión 10.2, utilizando el método de interpolación *Kriging* y el modelo de semivariograma gaussiano para describir y predecir el comportamiento de los datos extrapolados. El método de *Kriging* es un variograma que permite predecir el valor de una variable en locaciones donde no existen muestras, a partir del principio de auto correlación o dependencia espacial de una magnitud, lo cual mide el grado de relación/dependencia entre objetos cercanos y distantes.

Los resultados obtenidos en las zonas interpoladas resultaron ser coherentes con las tendencias regionales y locales de espesores erosionados.

Diseño del transecto

El transecto fue diseñado tomando en consideración la disponibilidad de secciones estructurales balanceadas y restituidas que estuviesen orientadas ortogonalmente al grano estructural de los Andes de Mérida. Una sola sección es disponible al sur de la cadena montañosa y tres al norte. Tomando en consideración los valores estimados para el desplazamiento lateral de la Falla de Boconó, se tomó la sección estructural más septentrional disponible, la cual se encuentra desplazada 40 km a la derecha de la sección sur. Valor que es cercano a los 30 km de desplazamiento dextral de la Falla de Boconó propuesto por Audemard y Audemard (2002), y Audemard y otros (2007). El transecto diseñado tiene una orientación NO-SE y una longitud aproximada de 170 km. El transecto incorpora la información e interpretación de datos del subsuelo de nueve (9) pozos, tres de ellos localizados sobre el transecto y con información termal (pozos 1,2 y 3 – **figuras 1 y 2**), y doce (12) líneas sísmicas.

Generación de Modelo Estructural Inicial

Los Andes de Mérida es una cadena montañosa con una alta complejidad estructural. Como fue mencionado previamente, en el presente trabajo, las interpretaciones estructurales de las secciones presentes en ambos flancos y la geometría propuesta para la parte central de la cadena fueron simplificadas y se tomaron en consideración solo la geometría y cinemática de las fallas principales, (Valera, Pampán, Jajó, Boconó, Retrocorrimiento de Cerro Azul y dos fallas ciegas). Se reconoce que otras fallas participan en la exhumación de los Andes de Mérida en la dirección del transecto seleccionado. Así como que el proceso de exhumación es altamente complejo y varía espacialmente (Bermudez y otros, 2010 y Bermudez, y otros, 2011). Además que el componente dextral de la Falla de Boconó, no considerado en el presente estudio, ejerce un rol importante en el proceso de exhumación de la cadena (Audemard, 1991; Colleta y otros, 1997, Audemard y Audemard, 2007). Sin embargo, en el presente trabajo, se considera que la geometría y desplazamientos verticales de las fallas seleccionadas, evidencian que las mismas son las responsables de la mayor parte de la exhumación de los Andes de Mérida y por lo tanto, el modelado cinemático a realizar podría conducir a una primera aproximación de la exhumación.

Teniendo en consideración lo anteriormente expuesto y definida la dirección y los extremos del transecto de estudio, se importó al programa *Canvas* versión 10, la geometría del modelo estructural inicial simplificado de los Andes de Mérida junto con un perfil topográfico. A manera

de solventar la falta de información sísmica en la zona del transecto que corresponde a los Andes de Mérida, se anexaron datos de geología de superficie (Hackley et al., 2005), los cuales se utilizaron para definir las secuencias estratigráficas y geometría de fallas aflorantes. Para rellenar en profundidad la estructura de la cordillera andina se modelaron diversos arreglos geométricos utilizando el programa *Fault Fold Forward* v.6, que permite reproducir la propagación de fallas utilizando el método *de trishear*.

Retrodeformación (*Restoration*) y Modelo Cinemático (*Forward modeling*)

La interpretación del modelo estructural inicial fue exportada en formato .dxf al programa *2D Move* versión 2009, para elaborar el modelo de retrodeformación del transecto de estudio a un momento previo al evento de levantamiento de los Andes. Los módulos de restauración de secciones “*Trishear*” y “*Restore*” del programa, que están basados en el método de conservación de área fueron utilizados para restaurar la sección al Eoceno Medio.

Posteriormente se procedió a la elaboración del modelo Cinemático hacia adelante, utilizando dos módulos del programa *2D Move*: i) “*Trishear*”, para modelar la cinemática de las fallas y ii) “*Flexural Isostasy*”, para simular la flexión o curvatura de las capas del modelo debido a las cargas sedimentarias soportadas. Para este modelo se reprodujo el levantamiento de los Andes a través del desplazamiento vertical de cinco fallas, tomándose como referencia los valores de desplazamiento máximos reportadas en la literatura para las diferentes áreas del transecto. Para la zona norte se tomó un valor entre $1,7 \pm 0,7$ mm/a (Wesnousky y otros, 2012), en la zona central se modeló con 0,8 mm/a (Kohn y otros, 1984) y la zona sur se utilizó 1,1mm/a (Guzmán y otros, 2013).

RESULTADOS

Modelado Cinemático

En este estudio se plantea un modelo estructural para los Andes de Mérida caracterizado por fallas de basamento inversas (Valera, Pampán, Jajó, Boconó y Cerro Azul) que son capaces de colocar en contacto formaciones de edad Pre-Cámbricas y Paleozoicas junto con otras de edades más jóvenes. Las geometrías de las fallas del modelo se ajustan a las interpretaciones de las secciones estructurales disponibles en los flancos de la cordillera que se realizaron a partir de datos sísmicos.

En el núcleo de la montaña se infirió una geometría de falla inversa de basamento de alto ángulo (**figura 4**). Esta geometría se obtuvo, al tomar en

consideración el tipo de roca, la edad y el grado de metamorfismo, desde bajo a alto, de las rocas de cada lado de las fallas (Schubert, 1969). De hecho Audemard (2003) en función a las profundidades de formación de rocas cretácicas del macizo (8-10 km de profundidad) y las elevaciones de exposición de las mismas (5 km) sugiere un levantamiento de 12-15 km en los últimos 3-5 Ma para los Andes de Mérida. Desplazamiento que pudiera ser explicado con la geometría de falla inversa de basamento de alto ángulo propuesta para el núcleo de la montaña.

Basado en el análisis de datos de traza de fisión de apatito (Bermúdez y otros, 2010), en este trabajo se asume que la exhumación de la cordillera andina sucedió de forma diacrónica y seccionada en tres bloques que se levantarían a diferentes edades: 13 Ma para la zona del noroeste del transecto, 8 Ma para el área central del transecto y 6 Ma para la zona del sureste del transecto.

En este estudio se propone una geometría con vergencia preferencial para los Andes de Mérida en dirección al noroeste, en la cual todas las estructuras del modelo se soportan sobre una rampa de despegue con buzamiento NO (**figura 4**). Esta geometría junto con la hipótesis de exhumación asumida, permiten plantear el desarrollo de la cadena andina como un sistema de ruptura en secuencia retrógrada, que se opone a la dirección del esfuerzo principal.

Modelo de Retrodeformación

El transecto de estudio pudo ser restaurado hasta el tiempo de Eoceno Medio, a una edad de 40 Ma (figura 4). Las interpretaciones de datos sísmicos de reflexión y las correlaciones estratigráficas (Delgado y otros, 2014), evidencian un aumento de espesor en la secuencia sedimentaria del Eoceno Medio al norte de la Falla de Valera. Este aumento de espesor implica que la Falla de Valera controló los depósitos del área durante este tiempo, como fue postulado por Restrepo y Toussaint (1978) y Colletta y otros (1997). Es por esto que se postula que la Falla de Valera, probablemente tuvo un comportamiento de falla normal durante el Eoceno Medio.

A partir del modelo de retrodeformación se logró estimar una longitud total de la sección de ~200 km en el Eoceno Medio, lo que comparado con la distancia actual de la zona de estudio permitió estimar un acortamiento total de la sección de 30 km aproximadamente, que representa al 15% de la distancia inicial (**figura 4**). El valor de acortamiento estimado resume la sumatoria de los tres grandes bloques considerados en este estudio, de los cuales: 7,8 km de acortamiento corresponde al norte, 7 km se estima para el sur y 13,2 km se

calcula en el bloque central, en donde se exhuman las secuencias más antiguas.

En la sección retrodeformada se puede apreciar el alto ángulo de fallas involucradas, las cuales podrían corresponder a fallas normales de alto ángulo que podrían estar asociadas a la reactivación de fallas normales antiguas, como es propuesto por diferentes autores (e.g. Renz, 1959; Maze, 1984; Colletta y otros, 1997). Esta geometría incide en el bajo valor de acortamiento estimado, en comparación con otros valores reportados para los Andes de Mérida, que se sitúan entre 60-40 km (Colletta y otros, 1997; Audemard y Audemard, 2002).

Modelo Hacia Adelante

El modelado hacia adelante del transecto se realizó desde el tiempo Eoceno Medio hasta el presente, obteniéndose ocho (8) estadios de deformación en los cuales se representa la exhumación de los Andes de Mérida. Como ha sido mencionado previamente, la secuencia de exhumación de la cadena fue definida en base a datos de termocronología (Bermúdez y otros, 2010), a partir de los cuales se asume que el norte de la montaña fue exhumado primero que el sur.

De un total de los ocho (8) estadios de deformación obtenidos, aquí discutiremos los eventos principales que controlan la exhumación y la geometría actual de los Andes de Mérida de los cuatro (4) estadios principales.

Mioceno Tardío (13 Ma)

El estadio de Mioceno Tardío representa el inicio de la exhumación de los Andes de Mérida en la zona norte del transecto de estudio, a través del movimiento inverso de la Falla de Pampán y una falla ciega (**figura 5a**). Ambas fallas presentan una vergencia hacia el NO y actúan como cuñas de basamento que sobrecorren depósitos Paleozoicos sobre otros más jóvenes. En este estadio aparece la Falla de Valera, reflejando su actividad de falla normal durante los estadios previos.

En este modelo se plantea que para este tiempo se empezaría a depositar la molasa sintectónica asociada al evento andino venezolano (UDVII – Santiago y otros, 2014), la cual según el CIEN, 1997 presenta edades entre Mioceno Superior al Plioceno. Esta molasa es precedida por una molasa asociada al desarrollo de la Cordillera Oriental de Colombia. Esta hipótesis se basa en la falta de terminaciones sísmicas asociadas a sedimentos depositados contemporáneamente con la tectónica venezolana en la base de las líneas sísmicas de la zona.

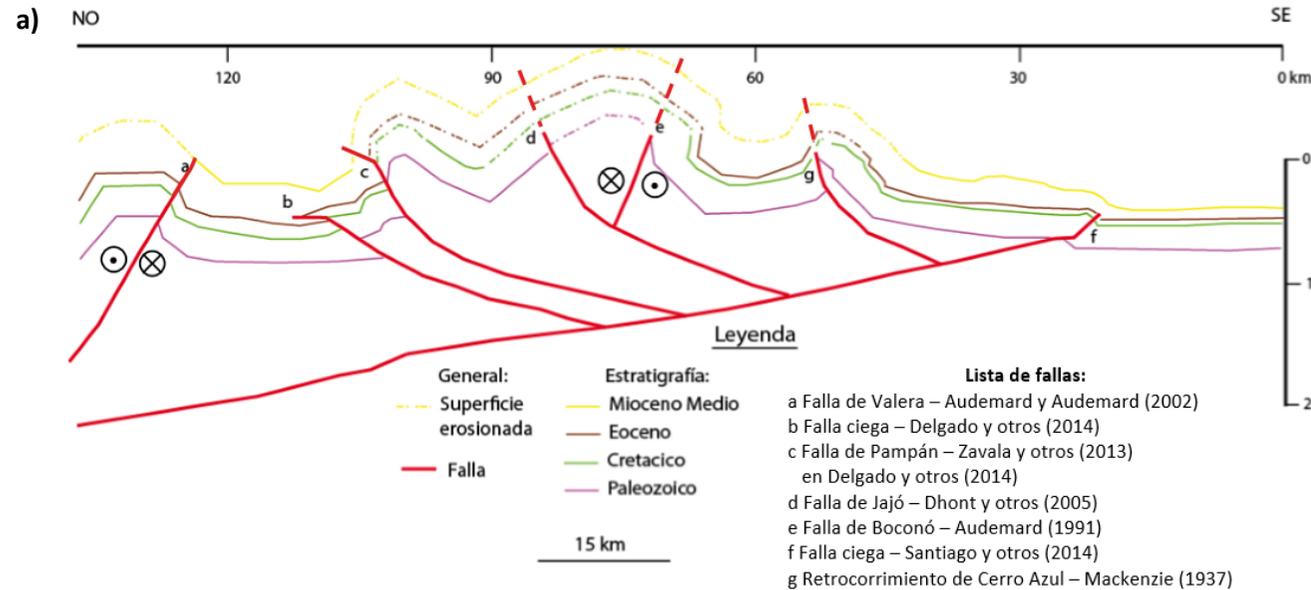
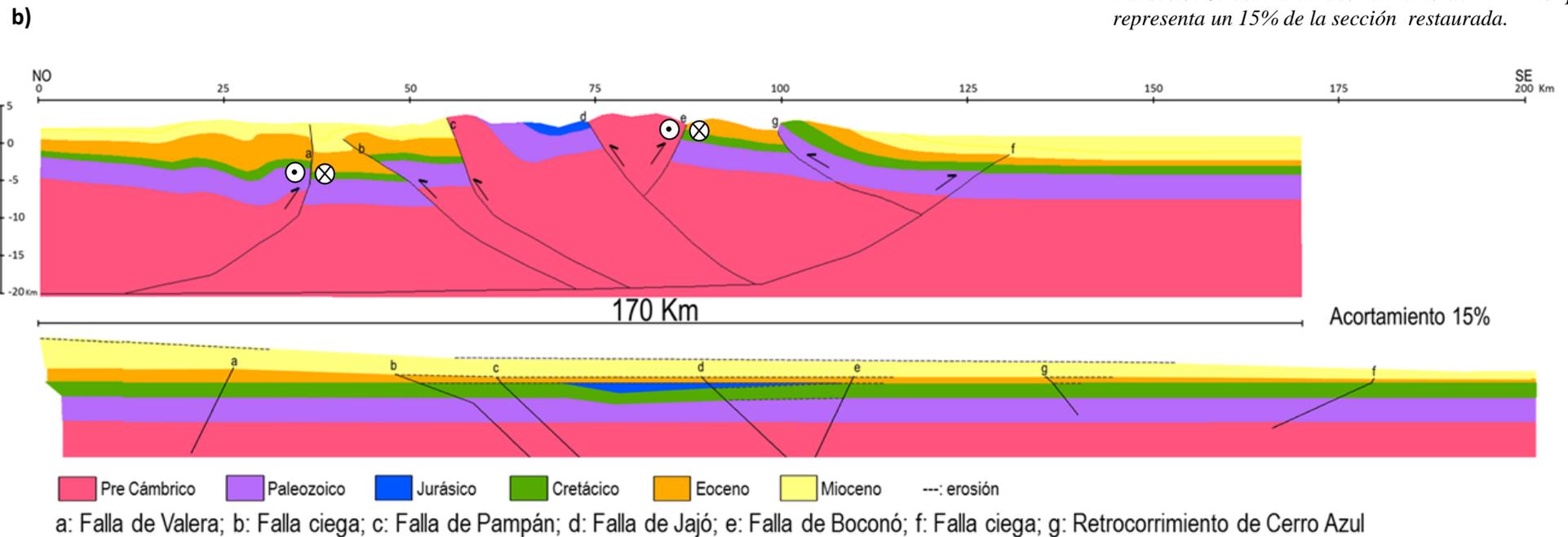
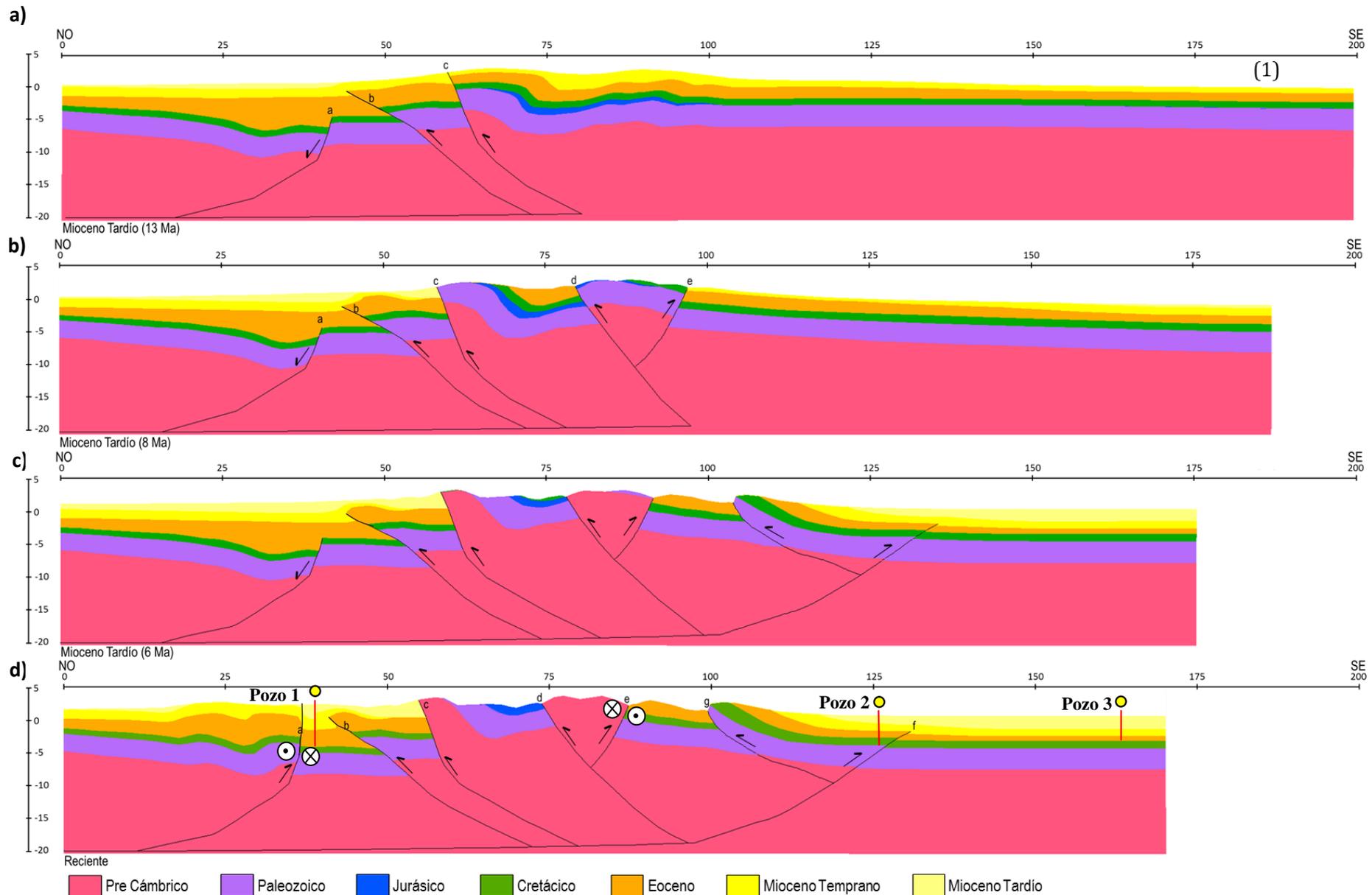


Figura 4. Modelo estructural y sección restaurada y balanceada del transecto de estudio. **a)** Modelo estructural inicial de los Andes de Mérida, cargado en el programa Canvas 10, sobre el cual se realizara el modelo Cinemático. En la construcción del mismo, se tomaron en cuenta solo las estructuras y fallas principales que pudieran controlar, en gran parte, la exhumación de los Andes de Mérida. El modelo resultante simplifica en gran medida la geometría de la cadena montañosa. La geometría de las fallas por debajo de los 12 km de profundidad fue extrapolada de modelos estructurales regionales (Yoris y Ostos, 1997; Audemard y Audemard, 2002; Cediél y otros, 2003). **b)** Modelo estructural inicial de los Andes de Mérida, cargado en el programa 2D Move, donde se realizó la retrodeformación. En la parte inferior se muestra la sección restaurada y balanceada del transecto. Se estima un acortamiento de 30 km lo que representa un 15% de la sección restaurada.





a: Falla de Valera; b: Falla ciega; c: Falla de Pampán; d: Falla de Jajó; e: Falla de Boconó; f: Falla ciega; g: Retrocorrimiento de Cerro Azul

Figura 5. Estadios del modelado Cinemático hacia delante (Forward modeling). **a)** Estadio Mioceno Tardío (13 Ma); inicio de la exhumación de los Andes de Mérida en la zona norte del transecto por medio de la Falla de Pampán, e inicio de la depositación de la molasa sintectónica asociada al evento andino. **b)** Estadio Mioceno Tardío (8 Ma); comienzo de la exhumación de la zona central del orógeno por medio de las fallas de Jajó y Boconó, continua la exhumación en el norte. **c)** Estadio Mioceno Tardío (6 Ma); exhumación de los Andes a lo largo de todo el transecto, en este momento comenzarían a exhumarse las estructuras del área 558 sur a través del Retrocorrimiento de Cerro Azul. **d)** Estadio Reciente (0 Ma); reactivación de la Falla de Valera en el norte del transecto. En el modelo estructural obtenido se representa el comportamiento transcurriente de las fallas de Boconó y Valera en la actualidad.

Mioceno Tardío (8 Ma)

Para el estadio de Mioceno Tardío a 8 Ma, se plantea en el centro del transecto el inicio del movimiento de las fallas de Jajó y Boconó, con vergencias NO y SE, respectivamente, ambas con un comportamiento inverso y casi simultáneos, que permiten desplazar casi hasta superficie rocas de edades paleozoicas, erosionándose casi en su totalidad las secuencias previamente depositadas (Jurásico al Mioceno Tardío-13 Ma-) (**figura 5b**). En el norte del transecto se observa que continúa el movimiento inverso de la Falla de Pampán, lo cual ocasiona el desplazamiento hasta la superficie de rocas de edades comprendidas entre el Eoceno y el Paleozoico (**figura 5b**).

Para este tiempo, la molasa andina sintectónica continúa depositándose en los flancos de la montaña, pero es el flanco norte el que recibe la mayor cantidad de depósitos debido a su cercanía con la incipiente cordillera.

Mioceno Tardío (6 Ma)

El estadio de 6 Ma representa el inicio de la exhumación de los Andes de Mérida en el bloque sur del transecto a través del desarrollo de la estructura de retrocorrimiento de Cerro Azul en dos fases. La primera fase se asocia al movimiento inverso de una falla ciega con vergencia SE que superpone rocas del Eoceno sobre depósitos molásicos más jóvenes. A continuación sucede la segunda fase de la estructura, con la activación de la Falla de Cerro Azul con un movimiento inverso en dirección NO, que desplaza hasta la superficie rocas de edad Paleozoica (**figura 5c**).

En este estadio se empieza a observar la diferencia de edad entre los depósitos en superficie del núcleo de la montaña con respecto a aquellos que se ubican en los flancos, debido a una mayor elevación del bloque central del transecto que propicia mayor tasa de erosión en esta zona y depositación a los extremos.

Reciente (0 Ma)

En el estadio de 0 Ma se produce la reactivación de la Falla de Valera, con un comportamiento inverso en el norte del transecto (**figura 5d**). El movimiento de esta falla pliega y deforma todas las secuencias depositadas del lado NO de la falla, donde se observa la erosión de parte de la molasa más reciente en comparación con el lado SE de la falla. En este estadio se alcanza la

configuración geométrica actual propuesta para los Andes de Mérida.

CONCLUSIONES

En este estudio se plantea un modelado cinemático que resume la exhumación de los Andes de Mérida en ocho (8) estadios de deformación. La geometría estructural simplificada propuesta por este trabajo junto con la hipótesis de exhumación asumida a partir de datos de termocronología, sugiere el desarrollo de cordillera andina como un sistema de ruptura en secuencia retrógrada opuesto a la dirección del esfuerzo principal y caracterizado por fallas de basamento con gran ángulo y con un movimiento inverso, capaces de desplazar y colocar en contacto en la superficie rocas de distintas edades y génesis.

La deformación estructural del modelo se resume en tres dominios principales: bloque norte, bloque centro y bloque sur. La estimación de acortamiento en todo el transecto alcanza unos 30 km, que corresponden al 15% del valor de la distancia inicial, la cual, según el resultado del modelado de retrodeformación sería de unos 200 km.

AGRADECIMIENTOS

N.A. agradece a Petróleos de Venezuela y al Proyecto GIAME por permitir desarrollar su trabajo especial de grado. Los autores agradecen al Departamento de Ciencias de La Tierra de la Universidad Simón Bolívar por todo el apoyo recibido para la realización del presente manuscrito.

REFERENCIAS

- ALEMAN, A. y RAMOS, V. (2000). Northern Andes. En Cordani, U., Milani, E., Thomas, Filho, A., Campos, D. (Ed.). *Tectonic Evolution of South America* (pp. 453-481). Rio de Janeiro: 375 Academia Brasileira de Ciencias y otras.
- AUDEMARD, F.E. (1991). *Tectonics of Western Venezuela* (PhD thesis). Rice University, Houston.
- AUDEMARD, F.A. (1993). *Néotectonique, Sismotectonique et Aléa sismique du Nord- Ouest*

- du Venezuela (système de failles d'Oca-Ancón) (PhD thesis). Université Montpellier II, France.
- AUDEMARD, F.A. (2003). Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quaternary International*, 101-102, 43-65.
- AUDEMARD, F.E. y AUDEMARD, F.A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345, 299–327.
- AUDEMARD, F.E., HERNÁNDEZ, G., LILIU, A., AZPIRITXAGA, I., BEJARANO, C., CABRERA, E., 8 DEL CASTILLO, H., DE TONI, B., DI CROCE, J., DUERTO, L., FERRER, B., JAIMES, M., MÁRQUEZ, X., VIOLINO, R., YSACCIZ, R., ALVAREZ, M., BPLÍVAR, F., CANTISANO, M., OLIVARES, C., PETIT, P., PINZON, O., SANTIAGO, N., SERRANO, I., TAYLHARDAT, V., TRUSKOWSKI, I., VERA, CORIAT, R., GIRAL, W. y GÓMEZ, M. (2002). *Proyecto Visión 392 Integrada del Potencial Petrolífero de Venezuela (VIPA)*. Informe interno Petróleos de Venezuela – Exploración.
- AUDEMARD, F.A., CARRILLO, E. y BECK, C. (2007). *Fieldtrip Guidebook for International Workshop on “Blind dip–slip faulting and strain partitioning in an active orogen: The Mérida Andes case, Venezuela”*. Santo Domingo, Estado Mérida, Venezuela, March 05–09.
- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., REYES-HARKER, A. y TORRES, V. (2007). Paleocene–Middle Miocene Flexural–Margin Migration of the Nonmarine Llanos Foreland Basin of Colombia. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3 (3), 51-70.
- BELTRÁN, C. (1994). Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000. *Memorias del VII Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas*. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos, Caracas, 541– 547.
- BERMÚDEZ, M. (2009). *Cenozoic exhumation patterns across the Venezuelan Andes: insights from fission-track thermochronology* (PhD Thesis). Université Joseph Fourier, Francia.
- BERMÚDEZ, M., KOHN, B., VAN DER BEEK, P., BERNET, M., SULLIVAN, P. y SHAGAM, R. (2010). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuelan Andes: Implications for Cenozoic Caribbean geodynamics. *Tectonics*, 29, TC5009, 1-21.
- BERMÚDEZ, M., VAN DER BEEK, P., y BERNET, M., (2011). Asynchronous Miocene–Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes. *Geology*, 39, Issue 2, 139-142.
- BLAZER, R. (1979). *Source rocks and hydrocarbon generation in the Maracaibo Basin, Western Venezuela*. Internal Report, Ksepl, Shell, Rijswijk.
- CEDIEL, F., SHAW, R. P. y CÁCERES, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean 412 Block. En Bartolini et al., (Ed.). *The Circum Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics* (pp. 815-848). AAPG 414 Mem.79.
- COMITE INTERFILIALES DE ESTRATIGRAFÍA Y NOMENCLATURA (CIEN). (1997). *Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela*. INTEVEP –Petróleos de Venezuela. Recuperado de www.pdvsa.com/lexico.
- CHIGNÉ, N. (1985). *Aspectos relevantes en la exploración de Apure*. Memorias II Simposio Bolívariano de Exploración petrolera en las cuencas subandinas, Bogotá, Asoc. Colombiana de Geol. y Geof. Petr., no.1, 3.
- CHIGNÉ, N., DE MONROY, Z., ARNSTEIN, R., CABRERA, E., OSUNA, S., MAHMOUDI, M., PILLOUD, A., SÁNCHEZ, A., LOUREIRO, D., GIRALDO, C., RUSSOMANNO, F., GALLANGO, O., VEGA, L., AROCHA, B. y RODULFO, H. (1996). *Proyecto Evaluación Petrolera de Barinas–Apure*. Corpoven. Informe inédito. CORPOVEN 007701,96 CDPLC.
- CLUFF, L. y HANSEN, W. (1969). *Seismicity and Seismic Geology of Northwestern Venezuela. Woodward-Clyde and Associates*. Informe inédito, Shell de Venezuela, vols. I y II.
- COLLETTA, B., ROURE, F., DE TONI, B., LOUREIRO, D., PASSALACQUA, H. y GOU, Y. (1997). Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuela Andes. *Tectonics*, 1 (5), 777–794.
- COOPER, M., ADDISSON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A. y TABOADA, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos, Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 79 (10), 1421-1443.
- CORDERO, M., ÁLVAREZ, M. C., BARRIOS, Y., CORTÉS, S., FAJARADO, A., GRILLET, R., HERNÁNDEZ, S., IZARRA, L., LARRAZABAL, R., MAYORA, C., NOYA, J., RIVAS, L., ROJAS, S., ROMERO, M., SALAS, A., SÁNCHEZ, A., TERÁN, E., AMY, M., BURRUS, M., CUILHE, L., FILAK, J., GOU Y., JIMÉNEZ, M., MAGNIER, C., PARNAUD, F., PASCUAL, J., SCHNEIDER, F. y SEGER, O. (2006). *Estudio Integrado de los Sistemas Petrolíferos de*

- Venezuela Occidental. Documento Interno. Petróleos de Venezuela.
- DELGADO, P., DELGADO, M., SOLORZANO, V., REQUENA, J. y FREITES, E. (2014). *Proyecto de Generación de Oportunidades del Flanco Norandino*. Documento Interno. Petróleos de Venezuela.
- DE TONI, B. y KELLOGG, J. (1993). Seismic Evidence for Blind Thrusting Of The Northwestern Of The Venezuelan Andes. *Tectonics*, 12, 1393-1409.
- DHONT, D., BACKÉ, G. y HERVOUËT, Y. (2005). Plio-Quaternary extension in the Venezuelan Andes: Mapping from SAR JERS imagery. *Tectonophysics*, 399, (1-4), 293-312.
- DUERTO, L., ESCALONA, A. y MANN, P. (2006). Deep structure of the Mérida Andes and Sierra de Perijá mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 90 (4), 505-528.
- GUZMÁN, O., VASSALLO, R., AUDEMARD, F., MUGNIER, J., OROPEZA, J., YEPEZ, S., CARCAILLET, J., ALAVARADO, M. y CARRILLO, E. (2013). ¹⁰Be dating of river terraces of Santo Domingo river, on Southeastern flank of the Mérida Andes, Venezuela: Tectonic and climatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 48, 85-96.
- HACKLEY, P., URBANI, F., KARLSEN, A. y GARRITY, C. (2005). *Mapa Geológico de Venezuela a Escala 1:750,000*. U.S. Geological Survey Open File Report 2005-1038.
- KELLOGG, J. y BONINI, W. (1982). Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. *Tectonics*, 1 (3), 251-276.
- KOHN, B., SHAGAM, R., BANKS, P. y BURKLEY, L. (1984). Mesozoic-Pleistocene fission track ages on rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications. *Geological Society America. Memoir*, 162, 365-384.
- LOAIZA, P. y HERNÁNDEZ, L. (1990). *Reactivación de la Exploración en Barinas*. Memorias del V Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, Sociedad Venezolana de Ingeniería Geofísica.
- LUGO, J. y MANN, P. (1995). Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo basin, Venezuela. En Tankard, A. J., R. Suárez, R. y Welsink, H. J. (Ed.). *Petroleum basins of South America* (pp 629-726). American Association Petroleum Geologist Bulletin 62
- MONOD, B., DHONT, D. y HERVOUËT, Y. (2010). Orogenic float of the Venezuelan Andes. *Tectonophysics*, 490, 125-127.
- MACKENZIE, A. (1937). The geologic section of the Barinas región, Districts of Barinas, Bolívar and Obispos, state of Zamora, Venezuela. *Bol. Geol. y Minería (Venezuela)*, 1, 253-266.
- MAZE, W. (1984). Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks. En Bonini, W., Hargraves, R., Shagam, R. (Ed.). *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics* (pp. 263-282). Geological Society American Memories.
- OSTOS, M. y SISSON, V. (2005). Geochemistry and tectonic setting of igneous and metaigneous rocks of northern Venezuela. En Avé Lallement, H.G., Sisson, V.B. (Ed.). *Caribbean-South American Plate Interactions, Venezuela* (pp. 119-156). Geological Society of America Special Paper, 394.
- OLDOW, J. S., BALLY, A. W. y AVE LALLEMANT, H. G. (1990). Transpression, orogenic float, and lithospheric balance. *Geology*, 18, 991-994.
- PARNAUD, F., LOUREIRO, D., PASSALACQUA, H., DE TONI, B., GALLANGO, O. Y CAPELLO, M. (1994). Análisis integrado de las cuencas de Barinas y Maracaibo. *Informe Gerencial # INT-02893.94*. Documento Interno INTEVEP.
- PINDELL, J. y BARRET, S. (1990). Geologic Evolution of the Caribbean Region: a Plate-Tectonic Perspective, En Case, J. E., Dengo, G. (Ed.). *The Geology of North America, the Caribbean Region* (pp. 405-432). Geological Society of America. *Geology of North America*, H, 405-432.
- RESTREPO, J. y TOUSSAINT, J. (1978). Terranes and Continental Accretion in the Colombian Andes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Universidad De Medellín, 1, 1-47. 489
- RENZ, O. (1959). Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela Occidental. *Boletín Geológico*, Caracas, 490 5(10), 3-48.
- ROD, E. (1956). Strike-slip faults of northern Venezuela. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 40, 457-476.
- SANTIAGO, N., BELLIZZI, L., HERNÁNDEZ, M., HERNÁNDEZ, Z., LARA, J., MARCANO, J., MOYA, J., OLIVEROS, R., OROPEZA, Y., PARRA, K., PEÑA, Y. y RIVAS, Y. (2014). *Proyecto de Evaluación del sistema petrolífero de Apure- Portuguesa*. Informe de Proyecto. Documento Interno. Petróleos de Venezuela.
- SCHUBERT, C. (1969). Geologic structure of a part the Barinas mountain front, Venezuelan Andes.

- Bulletin Geological Society American*, 80, 443-458.
- SCHUBERT, C., ESTEVEZ, R. y HENNEBERG, H. (1993). *The Boconó fault zone, western Venezuela*. American Association Petroleum Geologist / Sociedad Venezolana de Geólogos. International Congress. Caracas, Venezuela, 3/14–17/93, 77 (2): 347. 503
- SHAGAM, R. (1972). Andean research project, Venezuela: Principal data and tectonic implications. *Geological Society of America Memoir 132*, 449-463. 505
- SOULAS, J. (1986). *Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas*. VI Congreso Geológico Venezolano, Memorias 10. Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas, 6639– 6656.
- STAUFFER, K. y BETORET C. (1979). *Evaluación del potencial petrolífero de la Cuenca de Maracaibo*. Reporte interno, CORPOVEN, S. A.
- STÉPHAN, J. (1982). *Evolution Géodynamique du domaine Caraïbes: Andes et Chaîne Caraïbes sur la Transversale de Barquisimeto, Venezuela* (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Francia.
- TALUKDAR, S., GALLANGO, O. y RUGGIERO, A. (1985). *Formación La Luna y Formación Querecual de Venezuela: rocas madres de petróleo*. Memorias VI Congreso Geológico Venezolano, vol. 6, 3606-3642.
- TABOADA, A., RIVERA, L.A., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J. y RIVERA, C., (2000) Geodynamic of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5), 787-813.
- VILLAMIL, T. (1999). Campanean-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 153, 239-275.
- VALDÉS, G., AINGER, S., FIGUEROA, J., OCHOA, E., ZAIZARBITORIA, I., DALY, M., ZAMBRANO, E. y ZAMORA, L. (1992). *Geological and Petroleum Resource Study of Venezuela*. PDVSA and BP internal report.
- WESNOSKY, S., ARANGUREN, R., RENGIFO, M., OWEN, L., CAFFEE, M. W., KRISHNA, M. y PÉREZ, O. (2012). Toward quantifying geomorphic rates of crustal displacement, landscape development, and the age of glaciation in the Venezuelan Andes. *Geomorphology*, 141-142, 99-11.
- YORIS, F. y OSTOS, M. (1997). Petroleum geology of Venezuela. En Singer, J. M. (Ed.). *Well Evaluation Conference*, (pp.1-40). Schlumberger Oilfield Serv., Caracas, Venezuela.