
RELACIÓN DE LA DEFORMACIÓN EXTENSIONAL Y CONTRACTIVA EN LA REGIÓN CENTRO-SUR DE LA CUENCA DE MARACAIBO: IMPLICANCIAS PARA EL DESARROLLO DE POTENCIALES TRAMPAS PETROLÍFERAS

FERNANDO MARTÍNEZ, JEALITZA ROUX, JOSÉ FÉLIX CASTILLO, MARX BASTARDO y MARIELA CARRASQUEL

RESUMEN

La interpretación estructural de información sísmica 3D, y su integración con datos de pozos perforados en la región central y sur (bloques "B" y "VIII") de la Cuenca de Maracaibo, permitió establecer relaciones entre la deformación extensional y contractiva, a partir del reconocimiento de un conjunto de estructuras invertidas. Importantes estructuras de arpon y fallas de atajo se han desarrollado, representando buenas trampas estructurales, por lo que son consideradas como nuevas oportunidades exploratorias en la búsqueda de hidrocarburos. Diferentes perfiles sísmicos orientados N-S y O-E, muestran como

la inversión parcial de semi-grabenos mesozoicos, juegan un rol fundamental en el control de la deformación contractiva a lo largo de la región. Esta última, de especial interés para la formación de trampas estructurales, se relaciona con dos fases tectónicas principales (Paleoceno-Mioceno), asociadas con episodios tectónicos mayores que han afectado el margen norte de Venezuela, siempre correlativas con la colisión oblicua del Arco de Panamá y el flanco NO de Sudamérica, y con el levantamiento de los Andes meridionales, respectivamente.

La arquitectura de muchas fajas plegadas y corridas en el mundo, y de sus cuencas sedimentarias asociadas, esta dominada por estructuras contractivas que generalmente despliegan rasgos geométricos más o menos simples (Bally *et al.*, 1966; Boyer y Elliot, 1982). Sin embargo, en múltiples casos se ha podido reconocer como las estructuras contractivas que integran ambos contextos interfieren frecuentemente con estructuras extensionales previamente formadas, produciendo de esa manera patrones complejos de deformación (Scisciani *et al.*, 2002). Esta situación ha permitido entender que el estilo y la dinámica de la deformación contractiva, a lo largo de sistemas de *rift* o

márgenes pasivos, puede ser muy complicada, obedeciendo a la posible interacción entre rasgos tectónicos extensionales formados tempranamente y rasgos contractivos, comúnmente asociados a su inversión tectónica (Badley *et al.*, 1989; Butler, 1989).

La inversión tectónica es, en el sentido más simple, un término que agrupa todo aquel proceso de deformación donde áreas que poseen un previo relieve estructural negativo, se convierten en áreas con relieve estructural positivo, debido al cambio de un régimen de esfuerzos extensionales a uno compresivo (Cooper y Williams, 1989; Keller y McClay, 1995; Yamada y McClay, 2004). Uno de los factores más críticos en este proceso es su

gran dependencia de la herencia tectónica extensional, como por ejemplo la geometría y orientación de los planos de fallas normales, y la forma como son aplicado los esfuerzos compresivos sobre ellas, los cuales a su vez, se conjugan con la resistencia de las rocas, los fluidos presentes y el coeficiente de fricción entre otros factores (Sibson, 1995). Es por ello que las estructuras invertidas pueden desplegar diversos estilos, que pasan por el desarrollo de estructuras de arpon, formación de contrafuertes, retrocorrimientos, cabalgamientos fuera de secuencia, fallas de atajo y estructuras decapitadas, entre otras (Figura 1).

En el mundo se han reconocido grandes sistemas de *rift* y már-

PALABRAS CLAVE / Cuenca de Maracaibo / Estructuras Invertidas / Semi-Grabenos / Trampas Estructurales /

Recibido: 05/07/2010. Modificado: 15/11/2010. Aceptado: 16/11/2010.

Fernando Martínez. Estudiante de doctorado en Geología Estructural, Universidad de Chile (UC). Dirección: Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, UC. Plaza Ercilla 803, Santiago Centro, Chile. Profesor Asistente, Geología Estructural. Universidad de Oriente (UDO), Venezuela. e-mail: martinezfjh@hotmail.com

Jealitz Rox. Estudiante de maestría en Geofísica, Instituto Universitario Tecnológico del Estado Bolívar (IUT-BEB), Venezuela. Profesora, IUTEB, Venezuela. e-mail: jealitz@gmail.com

José Félix Castillo. Ingeniero Geólogo. Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA). e-mail: josefelix83@hotmail.com

Marx Bastardo. Ingeniero Geólogo. Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA). e-mail: marx_bastardo@hotmail.com

Mariela Carrasquel. Ingeniero Geóloga. Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA). e-mail: carrasquelmeh@yahoo.com

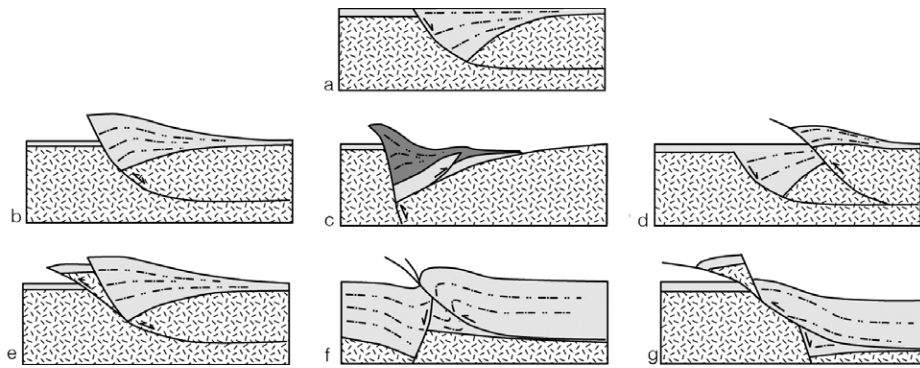


Figura 1. Estructuras asociadas a inversión tectónica. a: estado extensivo inicial, b: estructura en arjón, c: efecto de contrafuerte o *buttressing* contra una falla de alto ángulo, d: cabalgamiento de *by pass* a bloque inferior, e: falla de atajo o *short cut* de bloque inferior, f y g: corrimientos de decapitación y transporte de una falla normal. Modificado de Butler (1989) y Scisciani *et al.* (2002).

genes pasivos con múltiples evidencias de inversión tectónica. Igualmente, el origen de distintas cadenas montañosas se ha relacionado directamente con el cierre de antiguas cuencas extensionales. Ejemplos de ello son el Mar del Norte, la región central de los Apeninos en Italia, el Valle Magdalena en Colombia, la costa NE de Brasil, las cuencas extensionales mesozoicas del NO de Argentina y el margen pasivo Cretácico del oeste y NE de Venezuela. Estos sistemas guardan, en su arquitectura interna, estructuras típicas relacionadas con la reactivación e incluso decapitación de fallas extensionales antiguas, lo que a su vez ha permitido el desarrollo de regiones con excelentes oportunidades para la exploración de hidrocarburos. De tal modo, un aspecto importante en la inversión tectónica es que puede tener un efecto positivo en la creación de trampas estructurales.

En este trabajo se muestra un ejemplo clásico, en Venezuela, para el análisis de las relaciones tectónicas extensionales y contractivas, que permiten reconocer oportunamente diversos estilos estructurales de inversión tectónica, como los mostrados en la Figura 1. El área de estudio se ubica en la región centro-sur de la Cuenca de Maracaibo, donde se hallan los bloques de explotación "B" y "VIII" de PDVSA (Figuras 2 y 3). Las distintas interpretaciones estructurales, volcadas sobre perfiles de reflexión sísmica 2D-3D a lo largo de la cuenca, han permitido caracterizarla con una cuenca tipo "antepaís" intramontañosa (Audemard, 1991; Lugo, 1991). Sin embargo, en su porción central y meridional, se han reconocido importantes fallas de rumbo (p. ej. Falla Urdaneta, Falla Lama-Icotea, Pueblo Viejo) como parte de su anatomía, las cuales desarrollan cuencas *pull-apart* y estructuras invertidas NNE-SSO, reflejando la importancia que ha tenido la deformación transtensional y la inversión



Figura 2. Mapa morfoestructural simplificado del extremo NO de Venezuela, donde se muestra la Cuenca de Maracaibo, las principales cadenas montañosas y demás depocentros asociados. AP: Arco de Panamá, MSM: Macizo de Santa Marta, SP: Sierra de Perijá, MS: Macizo de Santander, CO: Cordillera Oriental, AM: Andes de Mérida. Modificado de Audemard y Audemard (2002).

tectónica en la región (Escalona y Mann, 2003) y, por ende, la estrecha relación que guardan las estructuras extensionales previamente formadas.

Apoyado en una nueva interpretación estructural de información sísmica 3D y en la integración de información de pozos, este estudio tiene como objetivo reconocer estilos de inversión tectónica que lleven a establecer relaciones entre las estructuras extensionales y contractivas, confinados a lo largo de la región central y sur de la Cuenca de Maracaibo. La identificación de potenciales trampas estructurales asociadas con estos estilos son un importante aporte, al representar nuevas oportunidades exploratorias para la búsqueda de hidrocarburos. El correcto entendimiento de estas relaciones

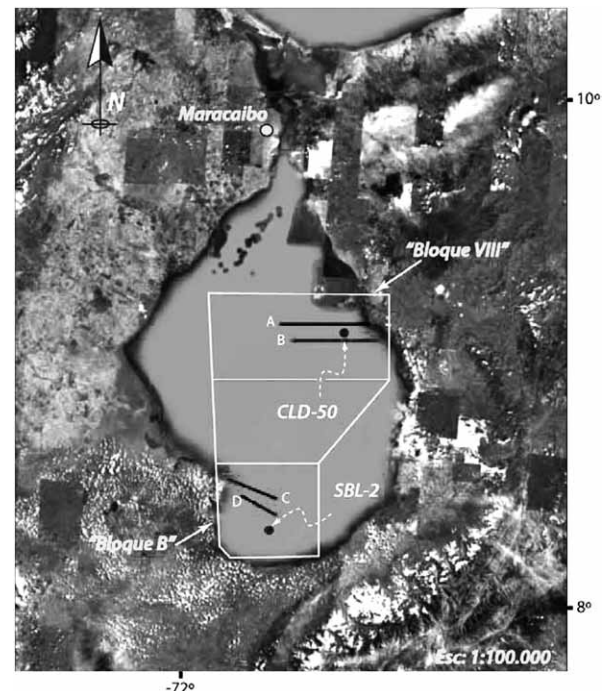


Figura 3. Ubicación del área de estudio, y del cubo sísmico integrado entre los bloques B y VIII.

ayudaría a aumentar las opciones de búsqueda de objetivos dentro de sistemas petrolíferos, debido a que la geometría extensional original aporta información relacionada con los espacios donde se ubican y se preservan las rocas madres, pero la formación de estructuras invertidas podría activar la migración de importantes volúmenes de hidrocarburos dentro del sistema.

La Cuenca de Maracaibo

La Cuenca de Maracaibo constituye una cuenca intracratónica activamente subsidiente que cubre ~30.000km², limitando al este y al oeste

por los Andes de Mérida (AM), la Serranía de Trujillo (ST) y por la Sierra de Perijá (SP), respectivamente, y al norte por el sistema de fallas rumbo-deslizantes dextral Oca-Ancón (Figura 3). Geométricamente define un dominio triangular que ha sido denominado como Bloque de Maracaibo (Roure *et al.*, 1997; Castillo y Mann, 2006), siempre dentro de una zona de deformación dominada por la interacción de las placas Caribe-borde norte de Sudamérica (Lugo y Mann, 1995; Audemard y Audemard, 2002). Su historia geológica graba múltiples fases tectónicas, que van desde la separación entre Norteamérica y Sudamérica durante el Jurásico, seguido por la migración desde el océano pacífico de la placa Caribe a partir del Paleoceno, hasta su posición actual (Lugo y Mann, 1995). Algunos autores, han decidido agrupar estas fases en tres episodios principales (Figura 4), los cuales pueden ser resumidos como:

Una primera fase tectónica durante el Jurásico Tardío, caracterizada por el establecimiento de sistemas de rift, y el desarrollo de importantes semi-grabenés corticales NNE-SSO (Maze, 1984; Bartok, 1993; Lugo y Mann, 1995; Parnaud *et al.*, 1995) controlados por fallas mayores NNE-SSO (ej. Falla Lama-Icotea, Falla Pueblo Viejo y Falla Urdaneta), los cuales fueron rellenados por potentes series continentales de sedimentos rojos (Pindell and Barrett, 1990; Bartok, 1993; Mann, 1999).

Una fase de margen continental pasivo durante el Cretácico Temprano-Tardío, donde se estableció una amplia plataforma clástica-carbonática, que afectó todo el borde oeste de Venezuela, acumulándose ~2000m de espesor de sedimentos polifásicos (carbonatos, lutitas y areniscas), definidos como el Grupo Collogo (formaciones Lisure, Maraca y Apón) y las formaciones La Luna y Colón (Kellogg, 1984; Azpirixaga, 1991; Escalona y Mann, 2006).

Una fase de margen activo, relacionada con el acortamiento tectónico del margen pasivo, la cual indujo deformación transtensional, inversión de fallas normales y continuas subsidencias a partir del Paleoceno-Eoceno, asociada fundamentalmente con la colisión del Arco de Panamá y el extremo norte de la placa Sudamericana, y combinado con la subducción de ángulo bajo de la Placa del Caribe bajo el norte de Sudamérica (Audemard, 1991; De Toni y Kellogg, 1993; Colletta *et al.*, 1997; Castillo, 2001; Escalona y Mann, 2006). Ello desencadenaría, en sucesivos eventos de reactivación de fallas antiguas principalmente mesozoicas a partir del Mioceno, episodio tectónico relacionado estrechamente

Cronología (Edad, Ma)		Formación	Ambiente Sedimentario	Eventos Tectónicos y Sistema Petrolífero		
1,6 5,5 25,2 36,0 39,4 49,0 54,0 66,5 71,3 83,5	CENOZOICO	Holoceno	La Puerta	Lacustre	Establecimiento de depocentros Miocenos 2 Episodio de Inversión Tectónica, y reactivación transtensional Deposición de Reservorios Comienzo del Margen Activo Deformación transtensional y 1 Episodio de Inversión Tectónica Formación de Trampas Deposición de Rocas Madres Desarrollo del Margen Continental Pasivo (Reactivación extensional de estructuras previas ?) Discordancia Discordancia Discordancia	
		Pleistoceno	Isnotu	Fluvial		
		Plioceno	Lagunillas	Parálico		
		Mioceno	La Rosa	Marino		
		Oligoceno	Icotea	Eólico-Lacustre		
		Eoceno	Tardío	Paují		Marino
			Medio			
			Temprano	Misoa		Parálico
		Paleoceno	Guasare	Marino somero		
		85,0 89,0 93,5 98,9 112,0 121,0 127,0 131,0	MESOZOICO	Cretácico		Maastrichtiense
Campaniense	Colón Socuy				Marino	
Cretácico	Santoniense			La Luna	Plataforma carbonática	
	Coniaciense					
	Turonense					
	Cenomaniense					
	Albiense			Maraca Lisure	Plataforma mixta	
	Aptiense			Apón	Plataforma mixta	
	Barremiense			Río Negro	Fluvial-Aluvial	
	Neocomiano					
Basamento Pre-Cretácico (Tr-Jr ?)	La Quinta Mucuchací	Aluvial-Lacustre Rocas Metamórficas	"Rifting" y Extensión Cortical (Jurásico Tardío)			

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada, usada para el área de estudio, con la representación de los principales eventos tectónicos reconocidos en la cuenca. Compilado a partir de Lugo (1991), Lugo y Mann (1995), y Escalona y Mann (2003).

con el levantamiento de los Andes de Mérida, en el occidente de Venezuela (Kellogg, 1984; Escalona y Mann, 2003; Dhont *et al.*, 2005).

Datos y Metodología

Los datos utilizados en este estudio corresponden a un cubo sísmico 3D (3036km²), que abarca los bloques de explotación "B y VIII" (Figura 3), e información de pozos correspondientes a la Unidad de Explotación Centro Sur Lago PDVSA. El análisis estructural se fundamentó en la interpretación tectónica de perfiles de reflexión sísmica orientados N-S y O-E, implementando un patrón de interpretación con un intervalo de uno cada 25 perfiles (considerado este intervalo como un espaciado donde se puede mantener un control en la correlación de los reflectores y sentido coherente de la data), y en la integración de información sísmica con da-

tos relativos a los topes estructurales de las series estratigráficas cenozoicas y mesozoicas presentes en el substrato. En este artículo sólo se muestran perfiles O-E, dado que iluminan mejor el contexto estructural. La longitud promedio de las líneas interpretadas es 14km, y la data sísmica se muestra a partir de 1500mseg, ya que la empresa proveedora de la información permite su uso sólo para niveles mayores a esta velocidad.

A fin de visualizar las diferentes geometrías asociadas con estructuras invertidas que actúan como potenciales trampas estructurales y entender mejor la interacción entre la tectónica extensional y contractiva que afecta series meso-cenozoicas durante el proceso de inversión tectónica en la región, se consideraron como guías importantes a los reflectores sísmicos asociados a la discordancia del Eoceno, al tope del Cretácico Tardío, al tope del Cretácico Temprano, y al Tope del posible basamento Jurásico

(Figura 4). A partir de los pozos SLB-2 y el pozo CLD-50 (Figura 3), fueron confeccionados sismogramas sintéticos, lo cual ayudó a definir los reflectores sísmicos de interés y ajustarlos para la densidad de pozos restantes. Esta información fue proyectada a los perfiles sísmicos más cercanos, para su posterior interpretación. Los criterios establecidos para la interpretación de fallas y plegamiento fueron: a) cambios bruscos de amplitudes sísmicas, b) presencia de reflectores deformados, c) pérdida o rupturas lineales del dato sísmico, d) repeticiones o ausencia de secuencias mostradas por los datos de pozos, y e) cambios abruptos de buzamientos y truncamiento de reflectores guías, entre otros.

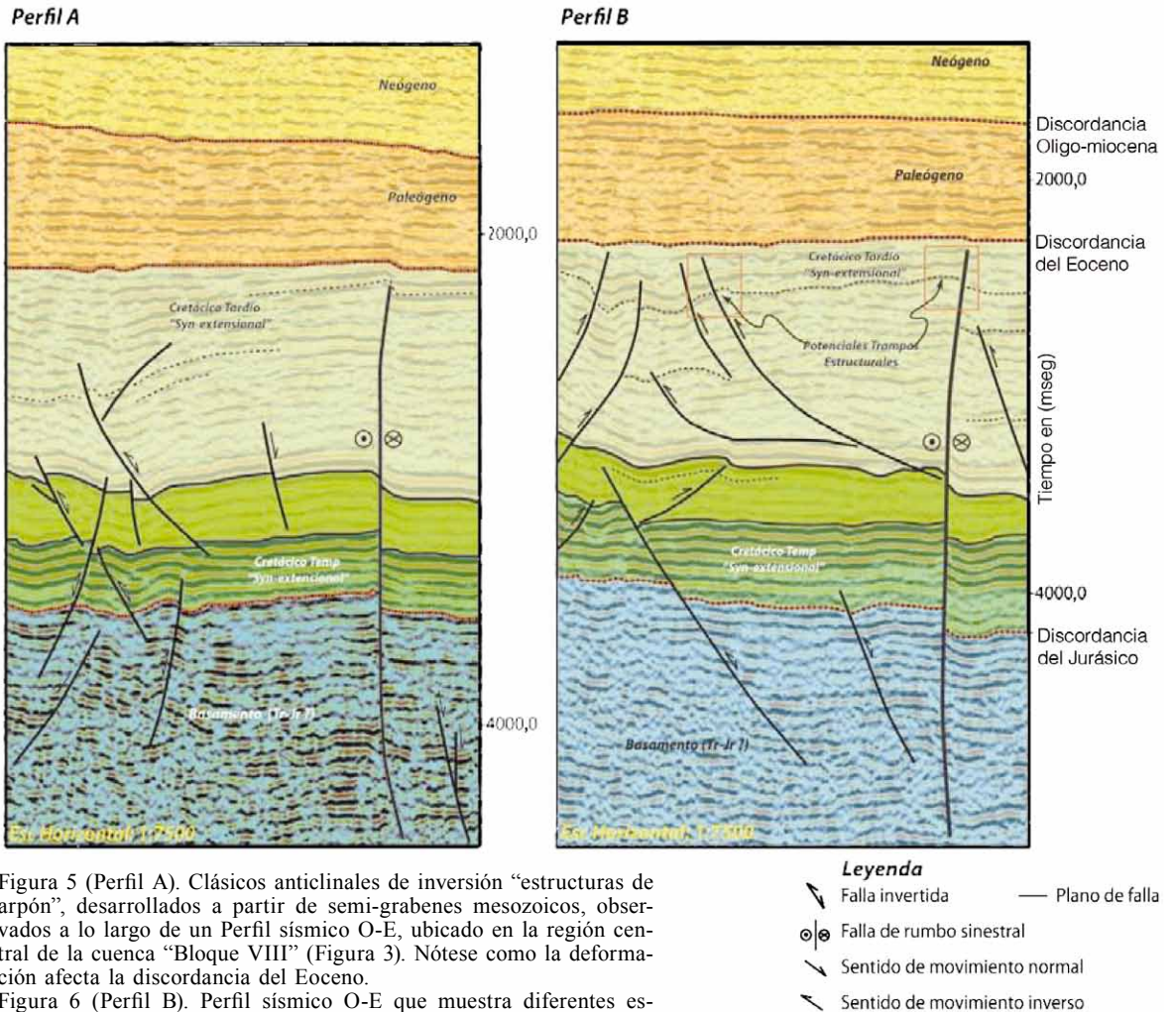


Figura 5 (Perfil A). Clásicos anticlinales de inversión “estructuras de arpón”, desarrollados a partir de semi-grabenos mesozoicos, observados a lo largo de un Perfil sísmico O-E, ubicado en la región central de la cuenca “Bloque VIII” (Figura 3). Nótese como la deformación afecta la discordancia del Eoceno.

Figura 6 (Perfil B). Perfil sísmico O-E que muestra diferentes estructuras de arpón que afectan las series jurásicas y cretácicas en la región central de la cuenca “Bloque VIII” (Figura 2). Así mismo se observa la clara variación de espesor del Cretácico Temprano en el bloque bajo de la falla Lama-Icotea, y la disposición de múltiples anticlinales bajo la discordancia del Eoceno, que son considerados como potenciales trampas petrolíferas.

Interacción entre Estilos Estructurales Extensionales y Contractivos

A lo largo de la región central y sur de la Cuenca de Maracaibo es posible reconocer múltiples situaciones estructurales, donde fallas normales de alto ángulo y fallas inversas de ángulo moderado ($>50^\circ$) interfieren al igual que las mostradas en la Figura 1. Esta relación contemplada entre ambos estilos es quizás más clara en los niveles profundos de la cuenca, donde mayormente yacen las series correspondientes al basamento Jurásico y al Cretácico Tardío. No obstante, en la sección intermedia, las unidades del Cretácico Medio-Temprano permiten que esta misma relación tienda a ser algo más difícil de evidenciar, ya que la deformación extensional clásica, caracterizada por fallas normales con bloques basculados y series syn-extensionales alojadas en sus bloques deprimidos; se encuentra parcialmente en-

mascarada y solapada por estructuras compresivas más jóvenes, que afectan notablemente a esta cubierta sedimentaria syn-extensional (Figuras 5 y 6).

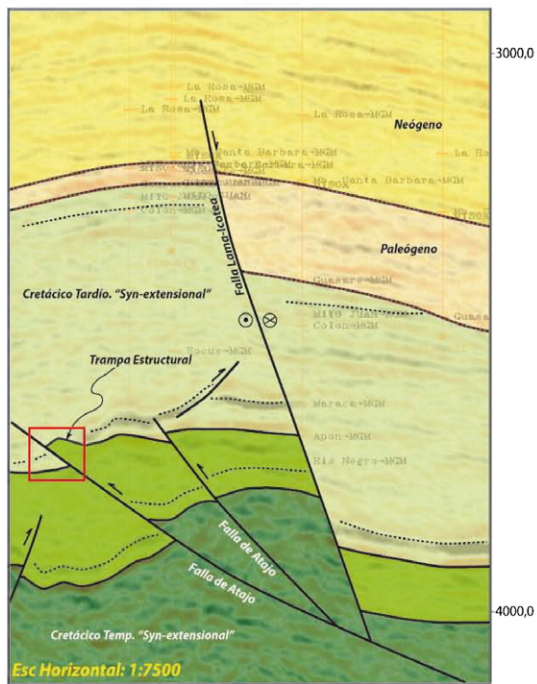
Las fallas normales interpretadas en este estudio corresponden a un arreglo NNE-SSO de estructuras de alto ángulo (Figuras 5 y 6) bien preservadas, que afectan notablemente a espesas secuencias del Cretácico junto a su basamento, inclusive éstas podrían llegar a cortar rocas del Paleozoico (aunque de estas últimas no se tienen datos de pozos en la región), como también han sido previamente interpretadas en la región central de la cuenca, de acuerdo a los estudios de Escalona y Mann (2003, 2006). Estas estructuras son ocasionalmente visualizadas formando geometrías de semi-graben, que definen los antiguos depocentros mesozoicos y controlan las variaciones de espesores en las unidades que integran al Grupo Cogollo, como se observan en las Figuras 4 y 5. Estudios

previos han relacionado estos rasgos estructurales con sistemas de fallas de primer orden, que inducen una importante deformación de rumbo con cuencas *pull-aparts* y elementos estructurales contractivos asociados dentro del Bloque de Maracaibo. Ejemplos de ellas son la Falla Lama-Icotea, la Falla de Pueblo Viejo y la Falla de Urdaneta (Lugo y Mann, 1995; Roure *et al.*, 1997; Escalona y Mann, 2003; Castillo y Mann, 2006; Martínez y Carrasquel, 2008; Martínez *et al.*, 2008).

Sin embargo, múltiples perfiles de reflexión sísmica profunda O-E, a lo largo de la región de estudio, han permitido reconocer estructuras clásicas de inversión tectónica (Figura 1) que actualmente yacen soterradas bajo la imponente discordancia del Eoceno. Entre ellas resaltan:

a) Estructuras de arpón NE-SO, formadas a partir de la reactivación parcial de los

Perfil C



Perfil D

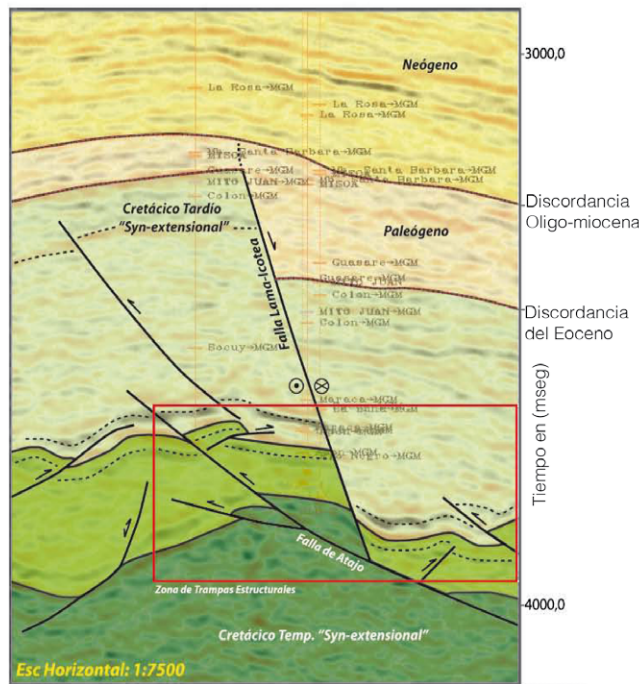


Figura 7 (Perfil C). Aspecto de las fallas de atajo (*short cuts*) que decapitan el tramo superior de la Falla Lama-Icotea, a lo largo del extremo sur del área de estudio “Bloque B” (Figura 2). De igual modo este perfil NO-SE muestra las trampas estructurales relacionadas con este estilo estructural.

Figura 8 (Perfil D). Perfil sísmico NO-SE del “Bloque B”, donde se visualiza el importante crecimiento de la secuencia oligo-miocena, en el bloque bajo de la Falla Lama-Icotea, al igual que el desarrollo de fallas de atajo (*short-cuts*) que generan potenciales zonas de entrapamiento en la región sur de la cuenca.

- Legenda**
- ↘ Falla invertida
 - ↙ Falla de rumbo sinistral
 - ↔ Sentido de movimiento normal
 - ↔ Sentido de movimiento inverso
 - ⋯ Reflectores guías
 - Plano de falla

bloques deprimidos, en los semi-grabenos que controlan los principales depocentros cretácicos (ejemplo en Figuras 5 y 6). Los aspectos más relevantes en este estilo estructural son: 1) el aumento relativo del espesor de las series cretácicas syn-extensionales, que forman anticlinales asimétricos en forma de punta de flecha contra las fallas principales (Figuras 1 y 6), para las cuales no se descarta un movimiento en el rumbo durante su reactivación, y 2) el alto ángulo de la falla (>50°).

b) Estructuras tipo *short-cut* o fallas de atajo, que es el estilo estructural más frecuente observado hacia el extremo central de la cuenca y, por lo general, decapitan y rotan las estructuras extensivas mesozoicas. Ello ocurre en respuesta a dos alternativas, una es que el tramo superior de la estructura extensiva, posea un buzamiento alto y no se reactive (Figuras 1 y 7), de modo que su inversión obliga a cortar en niveles inferiores para seguir su camino (Figura 1). La otra es que la dirección de compresión sea perpendicular al rumbo de una estructura extensional de ángulo alto (Sibson, 1995). Por esta razón, se observan fallas normales de muy alto ángulo, enraizadas en el dorso de los anticlinales asociados a estas fa-

llas, como se muestra en la figura 7, y como también se han reconocido en la porción más oriental de la cuenca, a partir de numerosos perfiles sísmicos regionales (Roure *et al.*, 1997; Escalona y Mann, 2006).

c) Retrocorrimientos, estilo estructural que está estrechamente ligado a los bloques deprimidos de las fallas invertidas, como se muestra en la Figura 1. En el área de estudio, transfieren el acortamiento tectónico absorbido por las estructuras de primer orden dentro de la cobertura mesozoica, convergencia opuesta al movimiento inverso de las fallas reactivadas (Figura 8). Generalmente mantienen despegues basales en las secuencias cretácicas, y nuclean en las fallas invertidas originando así anticlinales menores (Figura 6).

Una de las estructuras clásicas de primer orden, que controla y guarda un claro registro de la deformación polifásica en la región central y sur de la cuenca, es la falla Lama-Icotea. Considerada fundamentalmente como una estructura de piel gruesa, se caracteriza por presentar un movimiento relativo de rumbo sinistral, con desplazamientos de hasta 18km, lo cual le permite desarrollar una cinemática com-

pleja a lo largo del rumbo. Por ejemplo, esta estructura en la región central de la cuenca se observa como una clásica falla normal de crecimiento, al menos en un segmento superior, ejerciendo de esta manera un claro control en los espesores de la secuencia paleógena (Figuras 7 y 8). Sin embargo, en el extremo sur del área de estudio, su comportamiento es netamente transpresivo, induciendo a la formación de estructuras invertidas (Figuras 5 y 6), en esto contraste con las zonas de relajamiento y compresión desarrolladas a lo largo de su rumbo propuestas por Escalona y Mann

(2003) y Martínez *et al.* (2008).

Aunque en muchos estudios sísmico-estructurales la falla Lama-Icotea, es interpretada como una falla de rumbo sinistral (Audemard, 1991; Roure *et al.*, 1997; Martínez y Carrasquel, 2008), en la región meridional de la cuenca su imagen deja observar movimientos normales en los niveles estructurales profundos, que serían heredados de la fase tectónica extensional mesozoica. Así mismo, existen una serie de fallas de atajo que se propagan a partir de esta estructura, lo que permite establecer una buena relación entre la historia tectónica extensional mesozoica y contractiva cenozoica respectivamente, para el área de estudio, como lo muestran las Figuras 7 y 8.

Desarrollo de Potenciales Trampas Petrolíferas

Como ha sido demostrado a partir de numerosas campañas exploratorias a nivel mundial (Cuenca Taranaki en Nueva Zelanda, Mar del Norte, Cuenca Neuquén en Argentina, Valle Magdalena en Colombia, entre otros), las estructuras invertidas desarrolladas a partir de la reactivación contractiva de fallas normales forman importantes anti-

clinales idóneos para la acumulación de hidrocarburos (Macgregor, 1995), de tal modo que las cuencas que han sido localmente invertidas resultan muy atractivas, al menos para el establecimiento de buenas trampas estructurales. La región mostrada en este estudio presenta un buen arreglo de estilos contractivos considerados como trampas estructurales prospectivas, que están condicionadas por una evolución tectónica extensional temprana (Talukdar *et al.*, 1986; Talukdar y Marciano, 1994; Bueno, 1996; Gallango *et al.*, 2002; Escalona y Mann, 2006). Este aspecto obedece a la existencia de múltiples anticlinales asociados con la reactivación de fallas normales mesozoicas, que actualmente alojan importantes cantidades de petróleo dentro de las secuencias clásticas terciarias confinadas en las crestas de estas estructuras, y que se distribuyen tanto en el extremo norte como al sur de la cuenca.

Con base en esta consideración, la interacción entre estilos estructurales de génesis diferentes, reconocidas en la región estudiada, se ha convertido en un contexto llamativo para la acumulación de hidrocarburos, lo cual ha llevado a definirla como un área de interés. Los distintos tipos de trampas estructurales identificados en este estudio (Figuras 5 a 8) envuelven mayormente rocas mesozoicas, como ya se ha discutido arriba, de tal manera que las oportunidades exploratorias presentadas para esta región, se focalizan en estructuras invertidas con reservorios cretácicos (Grupo Cogollo). En tal sentido, la inversión parcial de arreglos antiguos de fallas normales NNE-SSO ha permitido desarrollar anticlinales con buenos cierres estructurales, los cuales preservan, en sus núcleos, potenciales rocas generadoras y reservorios de hidrocarburos de carácter clásticas y carbonáticas, siendo a su vez solapados por las discordancias terciarias (p. ej. discordancia del Eoceno), las que actúan como sellos estratigráficos en los procesos de migración y escape de fluidos (Figuras 5 y 6). Cabe resaltar que la deformación parcial y decapitación de las estructuras extensionales en los niveles profundos de la cuenca hace que sus depósitos mantengan geometrías relativamente similares a sus formas originales, generando de este modo, cierres estructurales relacionados con la extensión mesozoica (Figura 6).

Aunque, la mayoría de las trampas estructurales documentadas para esta cuenca se asocian con anticlinales que envuelven rocas esencialmente paleógenas y neógenas (Lugo y Mann, 1995; Roure *et al.*, 1997; Gallango *et al.*, 2002; Escalona y Mann, 2006), un nuevo

esquema estructural complejo, relacionado con la participación de estructuras invertidas profundas, resulta un escenario prospectivo para nuevos blancos exploratorios en la Cuenca de Maracaibo.

Edad de la Deformación

Durante este estudio, la edad de la deformación ha sido deducida a partir de las relaciones observadas entre las estructuras analizadas, con respecto a las discordancias de primer orden. Sin embargo, en la evolución tectónica de la Cuenca de Maracaibo y del flanco más noroccidental de Sudamérica siempre se ha propuesto una fase inicial para la compresión tectónica que grada desde el Paleoceno Tardío al Eoceno Tardío (~55 a ~37Ma), la cual ha sido relacionada con la colisión oblicua de la placa Caribe con el extremo nor-noroeste de la cuenca (Pindell y Barrett, 1990; Mann, 1999; Lugo y Mann, 1995; Escalona y Mann, 2006). Es por ello que se ha puesto especial interés en el entendimiento de la deformación contractiva, ya que constituye el pistón esencial para la inversión tectónica de las estructuras extensionales mesozoicas, permitiendo desarrollar importantes trampas estructurales en la región de estudio.

En los diferentes perfiles de reflexión sísmica, dispuestos en la zona sur de la cuenca (Figuras 5 y 6), es posible reconocer cómo la deformación contractiva asociada con la inversión parcial de estructuras extensionales es sellada por la discordancia del Eoceno. Esto es evidenciado más claramente por la forma como se truncan contra esta discordancia los paquetes de reflectores sísmicos correspondientes a la secuencia syn-extensional del Cretácico Temprano. Considerando esta observación, existiría al menos una fase inicial para la compresión y acortamiento tectónico (no cuantificado en este estudio), al menos durante el Paleoceno(?) y parte del Eoceno Temprano, ya que dentro del registro estratigráfico histórico, mucha de la sección basal del Eoceno no está presente.

Esta discordancia marcaría un primer pulso de deformación compresiva dentro de la cuenca, y estaría relacionada con los efectos del establecimiento de la cuenca de "antepaís", producto de la colisión oblicua del Arco de Panamá y el flanco norte de Sudamérica (Lugo y Mann, 1995). Sin embargo, hacia el norte del área de estudio, esta discordancia se encuentra plegada y desplazada por estructuras importantes, evidenciando otro episodio de deformación. Un caso particular se observa en el segmento más septentrional de la falla Lama-Icotea,

donde se ha podido reconocer una importante reactivación tectónica durante el Neógeno, específicamente en el Mioceno. Esto es claro por el plegamiento de algunos reflectores sísmicos (Figuras 6 y 7), correspondientes a secuencias terciarias jóvenes, que ocasionalmente muestran un crecimiento sintectónico. Esta reactivación es asociada con el escape hacia el norte del "Bloque Maracaibo" durante el Mioceno, producto del Levantamiento de los Andes de Mérida (Taboada *et al.*, 2000; Audemard y Audemard, 2002; Colmenares y Zoback, 2003).

Discusión y Conclusiones

Los niveles corticales profundos del centro y sur de la Cuenca de Maracaibo graban un espectacular registro de los diferentes episodios tectónicos meso-cenozoicos que han afectado a la región norte del continente sudamericano y Venezuela, los cuales han favorecido al desarrollo de interacciones tectónicas extensionales y contractivas complejas, reconocidas actualmente como típicos ejemplos de inversión tectónica. Los principales rasgos tectónicos extensionales observados en el substrato de la Cuenca de Maracaibo, se han relacionado estrechamente con la ruptura continental del extremo septentrional de Pangea durante el Jurásico Temprano (Pindell y Barrett, 1990); episodio que dio paso a la creación del océano Proto-Caribe, constituyendo un evento tectónico clave para el establecimiento de la arquitectura extensional mesozoica, el desarrollo de diferentes depocentros, y para el depósito de potenciales rocas generadoras de hidrocarburos a lo largo del flanco noroccidental de Venezuela.

Aunque la historia tectónica mesozoica es un factor fundamental para la formación temprana de fallas extensionales en la región de estudio, los sucesivos episodios de acortamiento tectónico, que han afectado al margen continental, al menos desde el Paleoceno Tardío (Pindell y Barrett, 1990; Mann, 1999; Escalona y Mann, 2003; Lugo y Mann, 1995) generaron un conjunto de estructuras contractivas, responsables del entrapamiento de grandes volúmenes de hidrocarburos. Diversos modelos tectónicos que involucran varios patrones de deformación han sido propuestos en base a las sistemáticas interpretaciones sísmicas-estructurales durante los últimos 20 años de exploración petrolera concentradas a la búsqueda de trampas prospectivas. La data mostrada en este estudio ha permitido reconocer numerosas estructuras invertidas relacionadas con la interacción de antiguas fallas extensionales posteriormente reactivadas.

vadas, mostrando la importancia que tiene el proceso de inversión tectónica dentro de la Cuenca de Maracaibo.

Estudios previos (Maze, 1984; Bartok, 1993; Lugo y Mann, 1995; Parnaud *et al.*, 1995; Castillo y Mann, 2006; Martínez y Carrasquel, 2008), han reconocido un patrón preferencial de estructuras extensionales y contractivas NNE-SSO a través de la Cuenca de Maracaibo, el cual concuerda con las observadas en este estudio. De tal forma, existe una relación directa entre las estructuras contractivas, y la inversión tectónica parcial de patrones extensionales, en un proceso que involucra una deformación de piel gruesa con propagación de las estructuras invertidas en la cobertura. Esquemas similares han sido interpretados por Bueno (1996), Roure *et al* (1997), y Escalona y Mann (2003), entre otros, e incluso han sido interpretados más al norte, en la vecina Cuenca de Falcón, por Gorney *et al* (2007).

A partir del análisis estructural de imágenes sísmicas profundas 3D, que iluminan al basamento pre-Cretácico, y a las series meso-cenozoicas, se ha podido extraer algunas conclusiones de interés:

1. Las estructuras extensionales asociadas a la deformación mesozoica, juegan un rol fundamental en el control de la deformación contractiva en la cuenca. Ello se evidencia por la inversión parcial de semi-grabenés jurásicos, donde la mayoría de las fallas normales actúan como rampas móviles y/o rígidas en los subsecuentes procesos de acortamiento tectónico, permitiendo el desarrollo de estructuras de apón, fallas de atajo y retrocorrimientos.

2. En concordancia con lo observado en estudios anteriores (Bueno, 1996; Roure *et al.*, 1997; Escalona y Mann, 2006; Castillo y Mann, 2006), la deformación en la región de estudio tiende a un doble comportamiento. Ello quiere decir que en niveles estructurales profundos, prevalece una deformación de piel gruesa que afecta notablemente al basamento pre-Cretácico (pudiendo afectar rocas paleozoicas); sin embargo, esta deformación es propagada hacia la cobertura sedimentaria, donde consolida un dominio de deformación de piel delgada que afecta a las series del Cretácico Medio y el Terciario, con despegues basales ubicados a nivel del Cretácico Medio. Este estilo es geométricamente muy similar al de una faja plegada y corrida constituida por un abanico imbricado.

3. Escenarios tales como la preservación de anticlinales armónicos y asimétricos que envuelven rocas generadoras y reservorios de hidrocarburos con buenos cierres

estructurales, la presencia de importantes discordancias (p. ej. Discordancia del Eoceno) que solapan las trampas relacionadas con estructuras invertidas actuando como sello en la migración y escape de fluidos, y la preservación parcial de las estructuras extensionales en los niveles profundos de la cuenca; hacen que la relación entre la deformación extensional y contractiva en el área de estudio sea un factor muy llamativo para la acumulación de hidrocarburos.

4. La edad de la deformación contractiva, que impulsaría el proceso de inversión tectónica en la cuenca, se relaciona con dos fases tectónicas principales: una fase inicial de compresión, estimada para el Paleoceno(?)-Eoceno Temprano, asociada al inicio de la colisión oblicua entre el Arco de Panamá y el flanco norte de Sudamérica; y un segundo período de reactivación ligado con el escape del “Bloque Maracaibo”, y el levantamiento de los Andes de Mérida en el Mioceno. Ello coincide con los eventos tectónicos mayores registrados hasta el momento en la evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca de Maracaibo y áreas vecinas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por Petróleos de Venezuela S.A. al suministrar la data sísmica y de pozos para este estudio, al Vicerectorado de la Universidad de Oriente, Venezuela, por el financiamiento otorgado y a Sindy Devis, por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- Audemard FE (1991) *Tectonics of Western Venezuela*. Tesis. Rice University. Houston, TX, EEUU. 245 pp.
- Audemard FE, Audemard FA (2002) Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* 354: 299-327.
- Azpirixaga I (1991) *Carbonate Depositional Styles Controlled by Siliciclastic Influx and Relative Sea Level Changes, Lower Cretaceous, Central Lake Maracaibo, Venezuela*. Tesis. University of Texas at Austin. Texas, EEUU. 151 pp.
- Badley ME, Price JD, Backshall LC (1989) Inversion, reactivated faults and related structures: Seismic examples from the Southern North Sea. En Cooper MA, Williams GD (Eds.) *Inversion Tectonics*. Geological Society, Special Publication N° 44. pp. 201-219.
- Bally AW, Gordy PL, Steward GA (1966) Structure, seismic data, and orogenic evolution of the Southern Canadian Rocky Mountains. *Can. Petr. Geol. Bull.* 14: 337-381.
- Bartok P (1993) Prebreakup geology of the Gulf of Mexico-Caribbean: its relation to Triassic and Jurassic rift Systems of the region. *Tectonics* 12: 441-459.

- Boyer SE, Elliott D (1982) Thrust system. *A.A.P.G. Bull.* 66: 239-267.
- Bueno E (1996) Superposed structural styles of the Maracaibo Basin, Venezuela. *Third ISAG*. St. Malo, Francia. pp. 17-19.
- Butler R (1989) The influence of pre-existing basin structure on thrust system evolution in the Western Alps. En Cooper MA, Williams GD (Eds.) *Inversion Tectonics*. Geological Society, Special Publication N° 44. pp. 105-122.
- Castillo M (2001) *Structural Analysis of Cenozoic Fault Systems Using 3D Seismic Data in the Southern Maracaibo Basin, Venezuela*. Tesis. University of Texas at Austin. Texas, EEUU. 189 pp.
- Castillo M, Mann P (2006) Cretaceous to Holocene structural stratigraphic development in south Lake Maracaibo, Venezuela, inferred from well and three-dimensional seismic data. *A.A.P.G. Bulletin*, 90: 529-565.
- Colletta B, Roure F, De Toni B, Loureiro D, Passalacqua H, Gou Y (1997) Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuelan Andes. *Tectonics*, 16: 777-794.
- Colmenares L, Zoback M (2003) Stress field and seismotectonics of northern South America. *Geology*, 31: 721-724.
- Cooper MA, Williams GD, (1989) Inversion structures – recognition and characteristics. In: Cooper MA, Williams GD (Eds.) *Inversion Tectonics*. Geological Society of London, Special Publication. 44: 341-347.
- De Toni B, Kellogg J (1993) Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern of the Venezuelan Andes. *Tectonics* 12: 1393-1409.
- Dhont D, Backé G, Hervouët Y, Choy J, Klarica S, Luxey P (2005) New constraints on the tectonics of the Venezuelan Andes from 3D geological modeling. *6th ISAG*: 218-221.
- Escalona A, Mann P (2003) Three-dimensional structural architecture and evolution of the Eocene pull-apart basin, central Maracaibo basin, Venezuela. *Mar. Petr. Geol.* 20: 657-678.
- Escalona A, Mann P (2006) An overview of the petroleum system of the Maracaibo Basin. *AAPG Bulletin*, 90: 657-678.
- Gallango O, Novoa E, Bernal A (2002) The petroleum system of the central Perijá fold belt, western Venezuela. *AAPG Bulletin* 86: 1263-1284.
- Gorney D, Escalona A, Mann P, Magnani MB, Bolivar Study Group (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. *AAPG Bulletin* 91: 653-684.
- Keller J, McClay K (1995) 3D sandbox models of positive inversion. En Buchanan JG, Buchanan PG (Eds.) *Basin Inversion*. Geological Society Special Publication 88. pp. 137-146.
- Kellogg J (1984) Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela-Colombia, and adjacent basins. En Bonini W, Hargraves R, Shagam R (Eds.) *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Geological Society of America Memoir N° 162. pp. 239-261.
- Lugo J (1991) *Cretaceous to Neogene Tectonic Control on Sedimentation: Maracaibo Basin*,

- Venezuela. Tesis. University of Texas at Austin. Texas, EEUU. 219 pp.
- Lugo J, Mann P (1995) Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. *A.A.P.G. Mem. 62*: 699-725.
- Macgregor D (1995) Hydrocarbon Habitat and classification of inverted rift basin. En Buchanan JG, Buchanan PG (Eds.) *Basin Inversion*. Geological Society Special Publication 88. pp. 83-93.
- Mann P (1999) Caribbean sedimentary basins: Classification and tectonic setting from Jurassic to present. En *Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the World*. Elsevier. B.V, pp. 3-31.
- Martínez F, Carrasquel M (2008) Modelo estructural de las secuencias cretácico-terciarias a nivel del bloque "B" del área sur del Lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia 33*: 56-60.
- Martínez F, Castillo J, Bastardo M (2008) New evidences of positive tectonic inversion in cretaceous sequences of the Block VIII area, Maracaibo Basin, Venezuela. *Interciencia 23*: 424-428.
- Maze W (1984) Jurassic La Quinta Formation in the La Sierra de Perijá, northwestern Venezuela; geology and tectonic environment of red beds volcanic rocks. En Bonini W, Hargraves R, Shagam R (Eds.) *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Geological Society of America Memoir N° 162. pp. 263-282.
- Parnaud Y, Gou Y, Pascual J, Truskowski I, Gallango O, Passalacqua H (1995) Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuela Basin. En Tankard A, Suárez S, Welsink H (Eds.) *Petroleum Basins of South America. AAPG Mem. 62*: 741-756.
- Pindell JL, Barrett S (1990) Geological evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective. En Dengo G, Case J (Eds.) *The Geology of North America*. Geological Society of America, Boulder, CO, EEUU. pp. 405-432.
- Roure F, Colleta B, De Toni B, Loureiro D, Passalacqua H, Gou Y (1997) Within-plate deformations in the Maracaibo and east Zulia basins, western Venezuela. *Mar. Petr. Geol. 14*: 139-163.
- Scisciani V, Tavarnelli E, Calamita F (2002) The interaction of extensional and contractional deformations in the outer zones of the Central Apennines, Italy. *J. Struct. Geol. 24*: 1647-1658.
- Sibson R (1995) Selective fault reactivation during basin inversion: potential for fluid redistribution through fault-valve action. En Buchanan JG, Buchanan PG (Eds.) *Basin Inversion*. Geological Society Special Publication 88. pp. 3-19.
- Taboada A, Rivera L, Fuenzalida A, Cisternas A, Philip H, Bijwaard H, Olaya J, Rivera C (2000) Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics 19*: 787-813.
- Talukdar S, Marcano F (1994) Petroleum systems of the Maracaibo Basin, Venezuela. En Magoon L, Dow W (Eds.) *The Petroleum System -From Source to Trap. AAPG Mem. 60*: 463-481.
- Talukdar S, Gallango O, Chin-A-Lien M (1986) Generation and migration of hydrocarbons in the Maracaibo Basin, Venezuela: An integrated basin study. En Leythaeuser D, Rullkötter J (Eds.) *Advances in Organic Geochemistry 1985: Part I. Org. Geochem. 10*: 201-279.
- Yamada Y, McClay K (2003) Application of geometric models to inverted listric fault Systems in sandbox experiments. Paper 2: insights for possible along strike migration of material during 3D hanging wall deformation. *J. Struct. Geol. 25*: 1331-1336.

RELATIONSHIP BETWEEN EXTENSIONAL AND CONTRACTIONAL DEFORMATIONS IN THE CENTER-SOUTH REGION OF THE MARACAIBO BASIN: IMPLICATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF POTENTIAL OIL TRAMPS

Fernando Martínez, Jealitz Roux, José Félix Castillo, Marx Bastardo and Mariela Carrasquel

SUMMARY

From 3D seismic-structural interpretations and well data integration, a set of inverted structures were identified, which allowed to establish the relationships between extensional and compressional deformation in the central-south region ("B" and "VIII" blocks) of the Maracaibo Basin, starting with the recognition of a group of inverted structures. Important harpoon structures and short cuts have developed, representing efficient structural traps and new exploratory opportunities in the petroleum industry. Different N-S and E-W seismic profiles show

how the partial inversion of the Mesozoic half-grabens plays a fundamental role in the control of compressional deformations in the region. The compressional deformation and the associated structural traps are related to two principal tectonic phases (Paleocene and Miocene) associated with tectonic episodes affecting the northern margin of Venezuela, correlated with the oblique collision between the Panamá Arc and the NW edge of South America, and the uplift of the Mérida Andes.

RELAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EXTENSIONAL E CONTRATIVA NA REGIÃO CENTRO-SUL DA BACIA DE MARACAIBO: IMPLICAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE POTENCIAIS ARMADILHAS DE PETRÓLEO

Fernando Martínez, Jealitz Roux, José Félix Castillo, Marx Bastardo e Mariela Carrasquel

RESUMO

A interpretação estrutural de informação sísmica 3D, e sua integração com dados de poços perfurados na região central e sul (blocos "B" e "VIII") da Bacia de Maracaibo, permitiu estabelecer relações entre a deformação extensional e contrativa, a partir do reconhecimento de um conjunto de estruturas invertidas. Importantes estruturas de arpão e falhas de atalho tem sido desenvolvidas, representando boas armadilhas estruturais, pelo que são consideradas como novas oportunidades exploratórias na procura de hidrocarbonetos. Diferentes perfis sísmicos orientados N-S e O-L, mostram como a inversão

parcial de semi-grabens mesozóicos, têm um papel fundamental no controle da deformação contrativa ao longo da região. Esta última, de especial interesse para a formação de armadilhas estruturais, se relaciona com duas fases tectônicas principais (Paleoceno-Mioceno), associadas com episódios tectônicos maiores que tem afetado a margem norte de Venezuela, sempre correlativas com a colisão oblíqua do Arco de Panamá e o flanco NO da América do Sul, e com a elevação dos Andes meridenhos, respectivamente.