

LA DEPRESIÓN SUBMARINA DE GUARACAYAL, ESTADO SUCRE, VENEZUELA: UNA BARRERA PARA LA PROPAGACIÓN DE LA RUPTURA COSÍSMICA A LO LARGO DE LA FALLA DE EL PILAR

FRANCK AUDEMARD, CHRISTIAN BECK, JASPER MOERNAUT, KOEN DE RYCKER, MARC DE BATIST,
JAVIER SÁNCHEZ, MORALIS GONZÁLEZ, CRISTHIAN SÁNCHEZ, WILLEM VERSTEEG, GUSTAVO MALAVÉ,
MICHAEL SCHMITZ, AURÉLIEN VAN WELDEN, EDUARDO CARRILLO y ANDRÉS LEMUS

RESUMEN

La depresión de Guaracayal, en el golfo de Cariaco, estado Sucre, Venezuela, fue inicialmente reconocida a partir de un levantamiento batimétrico realizado en la década de los ochenta. Un levantamiento de sísmica somera de alta resolución adquirido en el golfo de Cariaco a bordo del B/O Guaiquerí II en enero 2006 reveló que esta depresión resulta ser una cuenca en tracción activa (“active pull-apart basin”) sobre la traza activa submarina de la falla dextral de El Pilar, por su geometría y lo fresco y prominente de los escarpes de fallas que la limitan. Esta cuenca, con una profundidad de aguas de ~15m mayor que el fondo plano ubicado a unos -80m, mide aproximadamente 8km de longitud en dirección este-oeste y unos 2km transversalmente. La cuenca se forma en un relevo dextro,

es decir transtensivo, de la traza submarina de la falla de El Pilar, que secciona en dos porciones lo propuesto anteriormente como un único segmento de falla con extensión entre Cumaná y Casanay-Guarapiche. Esta separación entre ambas trazas de 2km parece ser suficiente barrera para la propagación lateral de la ruptura sísmica, tal como lo evidencia la sismicidad contemporánea e histórica. El tramo de falla Cumaná-Casanay, de unos 80km de longitud, ha requerido en dos ocasiones de la conjunción de dos sismos contiguos en dirección oeste-este (1797-1684 y 1929-1997) para romperse en su totalidad. No obstante, no se excluye la posibilidad de un evento que rompa toda la extensión del segmento, a pesar de este comportamiento sísmico reiterado.

F1 Nororiente venezolano presenta, a lo largo de la historia, la mayor actividad sísmica a escala nacional (Audemard, 1999b), siendo la fuente sísmica de los eventos más significativos la extremidad sur de la subducción de las Antillas me-

nores o la falla de El Pilar. Son numerosos los sismos históricos con testimonios escritos de daños sobre la población y el medio construido de la región, desde los comienzos de la dominación española a principios del s. XVI (Gómez, 1990; Grases *et al.*, 1999). Particularmente, la ciudad

de Cumaná ha sido afectada, hasta llegar a su destrucción parcial, por los eventos de: 1530, 1684, 1766, 1797 y 1853, así como por dos sismos contemporáneos en el s. XX, en 1929 y 1997 (Audemard, 2007).

Los sismos con epicentros en proximidad a, o en, el golfo de Cariaco presentan

PALABRAS CLAVE / Cariaco / Propagación / Ruptura / Segmentación / Sismología / Venezuela /

Recibido: 16/10/2006. Modificado: 15/08/2007. Aceptado: 18/08/2007.

Franck A. Audemard M. Doctorado en Tectónica, Université de Montpellier, Francia. Jefe, Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Venezuela. Dirección: FUNVISIS, Prolongación Calle Mara, Quinta Funvisis, El Llanito, Caracas 1073, Venezuela. e-mail: faudemard@funvisis.gob.ve.

Christian Beck. Doctorado de Estado, Université des Sciences et Techniques de Lille, Francia. Profesor, Université de Savoie, Francia.

Jasper Moernaut. Maestría y Doctorante en Geología, Universiteit Gent (UGENT), Bélgica.

Koen De Rycker. Ingeniero Sísmico, UGENT, Bélgica.

Marc De Batist. Doctorado en Geología, UGENT, Bélgica. Profesor, UGENT, Bélgica.

Javier Sánchez. Ingeniero Geofísico, Universidad Central de Venezuela (UCV). Ingeniero Geofísico, FUNVISIS, Venezuela.

Moralis González. Ingeniero Geofísico, UCV, Venezuela. Ingeniero Geofísico, FUNVISIS, Venezuela.

Cristhian Sánchez. Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. Ingeniero Geofísico, FUNVISIS, Venezuela.

Willem Versteeg. Ingeniero Informático, UGENT, Bélgica.

Gustavo Malavé. Doctorado en Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Presidente, FUNVISIS, Venezuela.

Michael Schmitz. Doctorado en Geofísica, Freie Universität Berlin, Alemania. Jefe, Unidad de Geofísica Aplicada, FUNVISIS, Venezuela.

Aurélien Van Welden. Sedimentólogo y Doctorando, Université de Savoie, Francia.

Eduardo Carrillo. Doctorado, Université de Savoie, Francia. Profesor, UCV, Venezuela.

Andrés Lemus. Biólogo. Gerente, Consultora Ambiental Universidad de Oriente, C.A., Cumaná, Venezuela.

particular interés para este estudio. Se ha propuesto preliminarmente que la falla de El Pilar presente un segmento continuo entre Cumaná y Casanay, que cruza longitudinalmente al golfo de Cariaco en toda su extensión (Funvisis, 1994; Beltrán *et al.*, 1996; Audemard *et al.*, 2000). Los eventos de 1929 y 1997 denotan que este segmento sismogénico no rompe completamente en asociación a un único sismo (Audemard, 2007). Un comportamiento similar ha tenido lugar en tiempos históricos Audemard (1999b, 2007). En vista de este comportamiento sismogénico reiterado, se ha realizado un levantamiento sísmico de alta y muy alta resolución en el golfo de Cariaco, con el concurso de las universidades de Gent (Bélgica), Savoie (Francia) y Oriente (UDO, Venezuela) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS, Venezuela), teniendo entre sus objetivos principales caracterizar la traza submarina de la falla de El Pilar en el golfo de Cariaco, con miras a determinar si tal comportamiento sísmico reiterado (al menos en dos ciclos contiguos) responde a alguna estructuración particular de la falla de El Pilar. Este trabajo solo presenta los resultados obtenidos de la sísmica de alta resolución adquirida en enero 2006 a bordo del B/O Guaiquerí II, y persigue explicar cómo la estructuración de la falla de El Pilar en su segmento submarino en el golfo de Cariaco controla la ocurrencia de sus sismos mayores.

La Falla de El Pilar

La falla de El Pilar acomoda una gran fracción del movimiento relativo de la placa Caribe hacia el este con respecto a Suramérica (Rod, 1956b; Pérez and Aggarwal, 1981; Stephan, 1982; Schubert, 1984; Soulás, 1986; Beltrán and Giraldo, 1989; Audemard *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001; Weber *et al.*, 2001, entre otros). No obstante, esta frontera de placas no está representada por un accidente tectónico único (Soulás, 1986; Beltrán, 1994) y más bien es una franja de deformación transcurrente-compresiva (transpresiva) en el Oriente

venezolano de más de 100km de ancho (Figura 1; Audemard, 1993; Singer and Audemard, 1997; Audemard, 1998; Audemard *et al.*, 2005). La porción más oriental en territorio venezolano de este gran sistema de fallas dextrales lo constituye la falla de El Pilar. Esta falla se extiende en dirección este-oeste por unos 350km, entre la fosa de Cariaco al oeste y el golfo de Paria al este (Figura 1). A excepción de un segmento en tierra de unos 80km de longitud, entre los golfos de Cariaco y Paria en el estado Sucre, y las trazas que limitan los cerros de Caigüire en Cumaná, la traza activa de la falla de El Pilar es esencialmente submarina, tanto en mar afuera al norte de la ensenada de Barcelona como en los golfos de Cariaco y Paria.

La contribución o participación de esta falla en la migración de la placa Caribe hacia el este con respecto a Suramérica es aún tema de discusión ví-

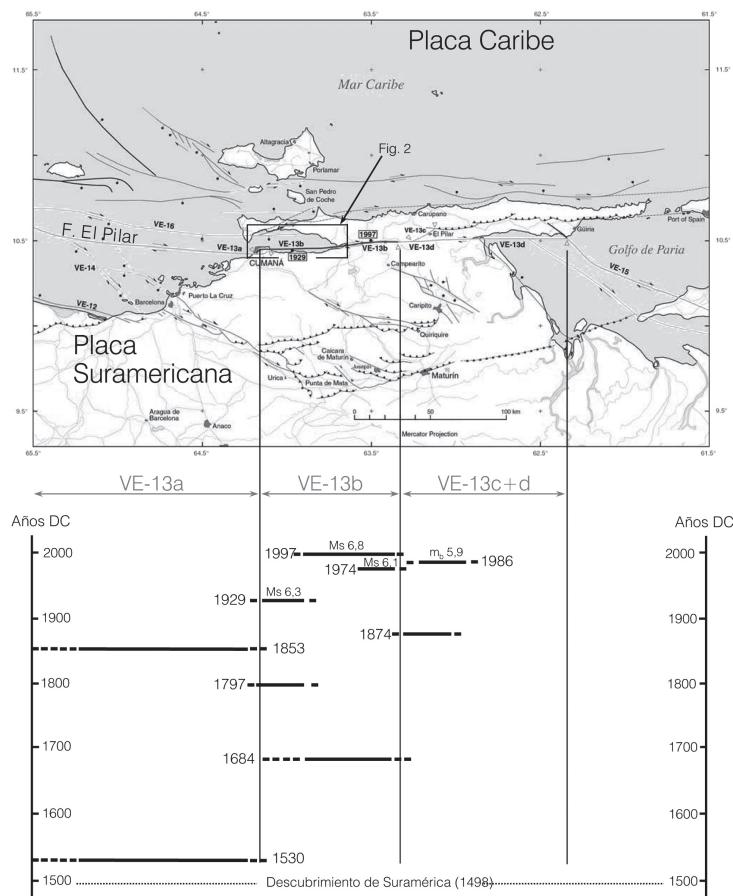


Figura 1. Mapa de fallas cuaternarias del Oriente de Venezuela según Audemard *et al.*, (2000), mostrando la extensión y secciones de la falla de El Pilar (VE-13), al igual que los últimos eventos sísmicos con ruptura superficial (1929 y 1997) ocurridos sobre ella, en la parte superior de la figura. Se señala la posición relativa de la Figura 2, la cual cubre la totalidad del golfo de Cariaco. En la parte inferior se muestra la distribución espacio-temporal de la actividad sísmica para los sismos de $Ms > 6$ a lo largo de la falla de El Pilar para el período 1498-1997, tomado de Audemard (2007). Para cada evento en el diagrama las longitudes de ruptura corresponden geográficamente con las secciones de la traza activa de la falla de El Pilar identificadas por sus subíndices.

vida y candente. No obstante, campañas de medición GPS de alta precisión realizadas en los últimos 20 años han permitido determinar que una franja de deformación de ~30km de ancho, contentiva de la falla de El Pilar, acomoda ~70% de los 20mm/a de velocidad relativa entre las placas Caribe y Suramérica (Pérez *et al.*, 2001). Más aún, aunque la falla ha sido considerada por numerosos autores como elemento constituyente del límite de placas, la controversia referente a su sentido de movimiento se mantuvo hasta la ocurrencia del sismo de Cariaco de 1997, ocasión en que su desplazamiento lateral derecho puro quedó claramente evidenciado y demostrado (Audemard, 1999a; Audemard, 2006). El debate aún se mantenía a pesar que la traza activa de la falla de El Pilar había sido cartografiada con base en criterios geomórficos de actividad cuaternaria por FUNVISIS (1994), publicada luego por Beltrán *et al.* (1996). Estos autores reportaron evidencias geomórficas diagnósticas de transcurriencia dextral a lo largo de su traza activa tales como drenajes desplazados dextrales, trincheras y ensilladuras de falla, lomos de presión, lagunas y escarpes de fallas (mayor detalle en figuras 1 y 2 en Beltrán *et al.*, 1996). Con base en esa cartografía, la traza activa de la falla de El Pilar es subdividida en cuatro secciones (FUNVISIS, 1994; Beltrán *et al.*, 1996; retomado por Audemard *et al.*, 2000), de oeste a este (VE-13a a VE-13d en Figura 1), a saber: 1) Una traza submarina de orientación este-oeste, al oeste de Cumaná, que limita por el sur la fosa o cuenca en tracción (*pull-apart basin*) de Cariaco, la cual se amortigua en los cerros de Caigüire en Cumaná, en un relevo transpresivo. 2) Una segunda porción que se extiende desde el flanco norte del “pop-up” de Caigüire hasta la curvatura transpresiva de Casanay-Guapiche, estando gran parte de su traza en el fondo marino del golfo de Cariaco. 3) Un segmento de ~30km de largo que diverge ligeramente hacia el ENE, extendiéndose entre los poblados de Río Casanay y El Pilar y conectándose con la falla de Tunapuy. 4) Una última porción de orientación este-oeste que cruza las zonas anegadizas de las Sabanas de Venturini, para luego correr en mar al sur de la costa sur de la península de Paria, antes de conectarse con el sistema

de fallas de Los Bajos-El Soldado de orientación NW-SE (VE-15 y sub-paralela al sur, respectivamente, en Figura 1) y éste a su vez con las fallas de Warm Springs en territorio trinitario, al igual que con un sistema inverso de orientación este-oeste ubicado al sur de la costa sur de Trinidad.

Sismicidad en el Oriente Venezolano

El catálogo sísmico instrumental de FUNVISIS (2007), que abarca desde 1910, evidencia que el nororiente venezolano se caracteriza por ser la región de mayor actividad sísmica a escala nacional. Esto está adicionalmente atestiguado por la frecuencia de sismos históricos que han producido daños en la región desde los comienzos de la dominación española a principios del s. XVI (Gómez, 1990; Grases *et al.*, 1999). En particular, Cumaná ha sido afectada, ocasionalmente hasta su destrucción parcial, por varios sismos históricos, entre los que ameritan mención los eventos de 1530, 1684, 1766, 1797 y 1853, así como dos sismos contemporáneos en el s. XX: El sismo de Cumaná del 17/01/1929 y el reciente terremoto de Cariaco del 09/07/1997 (Audemard, 1999b; Audemard, 2006).

Apartando la contribución sísmica de profundidad intermedia y profunda de la extremidad sur de la subducción de las Antillas Menores, que yace parcialmente bajo Trinidad y la península y golfo de Paria, la falla de El Pilar es la principal fuente sísmica en el noreste de Venezuela, tal como había señalado Rod (1956a). Sin embargo, todos los sismos históricos mayores ocurridos en esta región han sido adscritos a la falla de El Pilar sin corroboración geológica, a excepción de los dos terremotos mencionados ocurridos en el s. XX, por presentar ambos ruptura superficial cosísmica, al igual que el sismo del 04/05/1684, por reconocerse su falla generadora mediante una evaluación paleosísmica (Audemard, 1999b).

Para subsanar esto, Audemard (1999b, 2007), basándose en el estudio de los sismos históricos y apoyado en el análisis comparativo de la reevaluación de las fuentes documentales con las observaciones provenientes de una investigación paleosísmica de varias trincheras realizada sobre la ruptura del sismo de Cariaco de 1997, propuso una distribución espacio-temporal preliminar de los sismos de magnitud $M_s > 6,0$ y con asociación con la falla de El Pilar, entre la fosa de Cariaco y el golfo de Paria (parte inferior de Figura 1). Tal distribución muestra que la falla de El Pilar no rompe en la totalidad de su extensión durante un sismo, sino que lo hace por segmentos que tienen sus propias características sísmogénicas (mayores detalles en Audemard, 1999b, 2007). Para el segmento de falla en particular que se extiende entre los cerros de

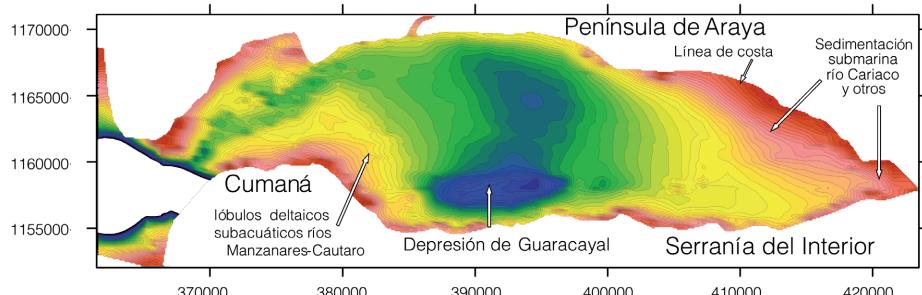


Figura 2. Mapa batimétrico del golfo de Cariaco, tomado de Global Mapper y basado en cartografía original de Caraballo (1982). Nótese la depresión de Guaracayal, en el sur del golfo, que presenta profundidades algo más elevadas que el resto.

Caigüire (Cumaná) al oeste y la población de Casanay en el este (Figura 1), se desprende del presente estudio que los últimos dos ciclos sísmicos de la falla de El Pilar atestiguan que este tramo de falla ha requerido de dos sismos contiguos para completar la longitud total de ~80km del mismo.

El primer ciclo está conformado por dos eventos, un primer evento en la porción más oriental de este tramo de falla, ocurrido en 1684, y un segundo sismo que afectó esencialmente a la ciudad de Cumaná en 1797. El segundo ciclo lo conforman dos eventos del siglo pasado, ocurridos el 17/01/1929 y el 9/07/1997. El primero ocurrió justo al este del casco antiguo de Cumaná, en el sector conocido como Punta Delgada, a partir de la identificación geológica por parte de Paige (1930) de rupturas de superficie cosísmicas en las salinas costeras, teniendo una longitud total de ruptura no mayor a 30km y una magnitud seguramente inferior a $M_w 6,7$ (Mocquet *et al.*, 1996). Por su parte, el sismo de Cariaco de 1997 de $M_s 6,8$ rompió la superficie del terreno entre Villa Frontado y Casanay, en la prolongación hacia el este del golfo de Cariaco, sobre una longitud de 36km (Audemard, 1999a, 2006). No obstante, basado en la distribución de las réplicas más someras de dicho evento calculadas por Baumbach *et al.* (2004), se pudo establecer que dicha ruptura, aunque submarina, debía prolongarse hacia el oeste, dentro del golfo de Cariaco, al menos hasta San Antonio del Golfo-Marigüitar.

El Golfo de Cariaco

El golfo de Cariaco es un cuerpo de aguas con una longitud de ~60km en dirección este-oeste y un ancho promedio próximo a los 9km (Figura 2), cuya geometría responde a un fuerte control estructural a lo largo de sus costas norte y sur (Caraballo, 1982). Este golfo está en conexión con mar abierto en su extremo occidental, al noroeste de Cumaná. El mapa batimétrico de esta cuenca marina levantado por Caraballo (1982) pone en evidencia un

fondo relativamente plano en su parte más central, con paredes de fuerte pendiente al norte y sur, asemejando una "bañera". Por el contrario, su profundidad disminuye hacia la costa progresivamente en su extremo oriental, reflejando el aporte sedimentario del río Cariaco y otros afluentes. De igual manera, se puede reconocer los lóbulos subacuáticos de los ríos Manzanares y/o Cautaro en su extremo suroccidental, en proximidad a Cumaná y su desembocadura (Figura 2). En esta zona, la máxima profundidad de agua es de ~60m, en el fondo de un cañón submarino orientado NE-SW, que permite la conexión entre la fosa de Cariaco, por intermedio del cañón submarino del Manzanares, con la porción central más profunda del golfo. En consecuencia, este cuerpo de agua, en períodos glaciares, cuando el mar desciende hasta en unos 100-120m, ha necesariamente quedado aislado del mar, pudiendo haber funcionado como un cuerpo de agua dulce (lago) o más probablemente como una zona cenagosa, a semejanza de las lagunas de Campona y Buena Vista, que hoy se desarrollan en la margen oriental del golfo de Cariaco. El análisis detallado posterior de la información sísmica adquirida permitirá evaluar el comportamiento de esta cuenca en función de las fluctuaciones eustáticas.

En mayor detalle, el análisis del mapa batimétrico del golfo de Cariaco revela la presencia de una depresión pequeña y alargada en dirección este-oeste, a lo largo de la costa sur del golfo, entre los asentamientos de Güirintal y Guaracayal, ubicados al menos a 6km al oeste de Marigüitar (Figuras 2 y 3). Esta depresión, de ~8km de largo y ~2km de ancho, denominada depresión de Guaracayal por Caraballo (1982), es unos 15m más profunda que el fondo relativamente plano circundante del golfo, alcanzando una profundidad máxima entre 85 y 90m. Esta depresión submarina asemeja morfológicamente una cuenca en tracción (*pull-apart basin*), anidada en un relevo transtensivo de la falla dextral de El Pilar. Adicionalmente, esta depresión submarina

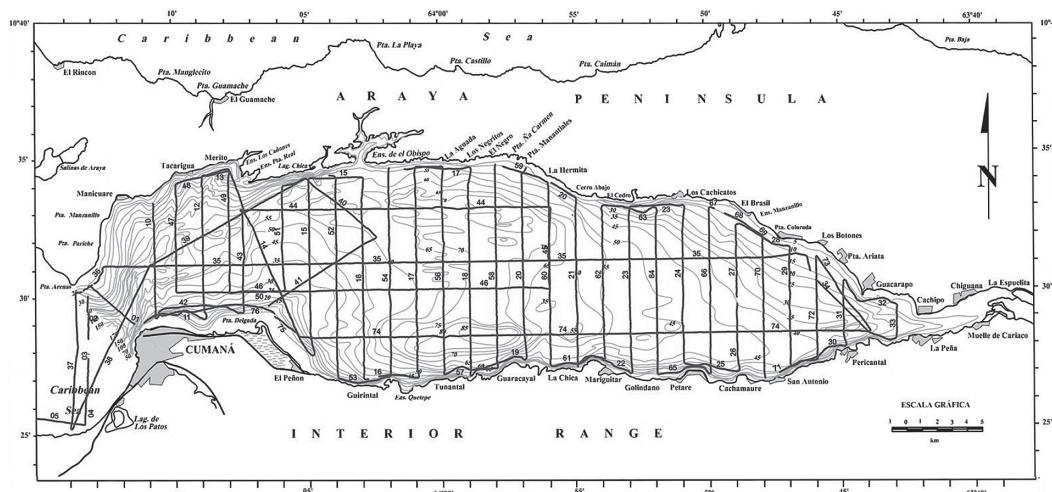


Figura 3. Tendido de líneas sparker grabadas en la campaña de adquisición de enero 2006 a bordo del B/O Guaiquerí II, reportadas sobre mapa batimétrico de Caraballo (1982).

satisface las relaciones geométricas de éstas (su longitud es 3 a 4 veces su ancho; Aydin y Nur, 1981). La adquisición sísmica de alta resolución descrita a continuación persigue, entre otros objetivos, verificar esta hipótesis.

Levantamiento sísmico marino

Se adquirieron cerca de 1000km de líneas sísmicas de alta y muy alta resolución del fondo marino del golfo de Cariaco a bordo del Buque Oceanográfico Guaiquerí II en enero 2006, donde 2/3 correspondieron a líneas de alta resolución y 1/3 a líneas de muy alta resolución. Los equipos utilizados para ambas adquisiciones fueron un sparker de 1,1kHz y un perfilador de fango (*sub-bottom profiler* o *pinger*) de 3,5kHz, respectivamente. En vista que únicamente se discutirá en este artículo la sísmica somera de alta resolución adquirida, la Figura 3 solo muestra el levantamiento de líneas *sparker* grabadas. Los parámetros utilizados durante la adquisición de estas líneas de alta resolución fueron tasa de disparo de 0,75s, duración de grabado de 0,5s y frecuencia de muestreo de 4kHz. La fuente sísmica utilizada fue un sparker ‘Centipede’ multielectrodo de 300J de potencia e intervalo de frecuencia de 400-1500Hz, que fue fijado para este levantamiento en 1,1kHz. La unidad receptora era un *streamer* de un solo canal, compuesto por 8 hidrófonos. Fuente y receptor fueron arrastrados detrás del barco en la superficie del mar. La navegación y posicionamiento, además de los equipos GPS del barco, se controló con un sistema GPS SIMRAD Shipmate. La data de posicionamiento y sísmica fue grabada por un equipo ELICS Delph-2, en formato SEGY. Previo a su grabación, la señal sísmica fue pasada por un filtro pasabanda Rockland

751A para remover aquellas frecuencias $<200\text{Hz}$ y $>2000\text{Hz}$.

De manera general, la mayoría de las líneas (Figura 3) se adquirieron perpendicular y paralelamente a la falla de El Pilar de orientación subecuatorial. Las líneas norte-sur, perfiladas con mayor frecuencia, se adquirieron con una separación de 1' de longitud (~1,85km). Por el contrario, las líneas este-oeste no siguieron un espaciamiento regular. Mas bien, su ubicación respondió a dos objetivos específicos: 1) La más larga de las líneas (74) cruzó longitudinalmente al objetivo tectónico programado, la depresión de Guaracayal. 2) Las demás líneas este-oeste al norte de la primera persiguieron perfilar la zona menos perturbada estructuralmente del golfo (44 y 46). La línea 46 en particular tiende a registrar el abandono progresivo hacia el este de los lóbulos deltaicos subacuáticos del río Manzanares por acción del movimiento dextral de la falla de El Pilar (Figuras 2 y 3).

La falla activa de El Pilar

Aunque las líneas antes descritas se obtuvieron con múltiples propósitos, esta contribución se centra en la estructuración mayor de las trazas submarinas de la falla de El Pilar, con base en la evaluación de algunas líneas submeridianas.

Con miras a visualizar la variación lateral de la falla de El Pilar en la depresión de Guaracayal y alrededores, se ha construido un diagrama panel con 7 líneas norte-sur espaciadas ~3,7km (Figura 4). Éstas están debidamente georeferenciadas y alineadas sobre una línea este-oeste, lo que permite realizar correlaciones espacialmente correctas. La profundidad de las líneas está en doble tiempo de viaje (*two-way traveltime*; TWT) en milisegundos. La mayoría de las líneas adquiridas con el sparker penetra-

ron verticalmente entre 0,12 y 0,15s TWT. Por el contrario, la distancia horizontal está expresada en miles de metros. Por ejemplo, la línea 15 en el tope del diagrama tiene 8km de longitud.

De la interpretación del diagrama panel se desprende que la falla de El Pilar, la cual presenta una traza única en proximidad a la costa de El Peñón (justo al Este de Cumaná; Figura 3), se separa en dos trazas subparalelas que delimitan una zona con el fondo marino levemente depri-mido. Esto se evidencia claramente en los perfiles 16, 18, 20 y 21 de la Figura 4. Ambas trazas son visiblemente activas, como lo denota la disruptión

de todos los reflectores que identifican el relleno sedimentario del golfo de Cariaco, así como la presencia de escarpes de fallas muy conspicuos en el lecho marino del golfo. Más aún, cuando la falla presenta una traza única, al oeste y este de la depresión de Guaracayal (líneas 15 y 23 de la Figura 4), también se percibe la deformación o perturbación de los reflectores más someros y la disruptión del piso marino. Igualmente se aprecia como el escarpe de la traza norte en la depresión de Guaracayal crece en su dimensión vertical en sentido oeste-este a medida que se adentra en la depresión (líneas 18 y 20 de la Figura 4), para luego desvanecerse progresivamente al este. Por su parte, la expresión morfológica de la traza sur en el fondo marino, casi inexistente hacia el oeste (perfiles 15 y 16), va aumentando hacia el este, aún fuera de la depresión de Guaracayal (línea 23 de la Figura 4).

Igualmente, se puede visualizar muy particularmente entre las líneas 16 y 21 de la Figura 4 que las secuencias o paquetes sedimentarios depositados en el subsuelo de la depresión de Guaracayal, entre ambas trazas de la falla de El Pilar, son más potentes que sus equivalentes presentes fuera de ella, aunque se carezca de un control crono-estratigráfico preciso, a falta de núcleos continuos de control en los distintos bloques tectónicos. De esto se deduce que ambas trazas de la falla de El Pilar que limitan esta conspicua depresión en el fondo marino, aún cuando se conoce que la falla de El Pilar es esencialmente dextral pura (Aude-mard, 2006), han presentado localmente una componente normal de movimiento muy significativa, contemporánea a la sedimentación reciente en el golfo de Cariaco.

De la Figura 4 se desprende también que la zona de falla activa de El Pilar siempre tiene escapes de gas asociados, lo cual enmascara parcialmente los reflectores

sísmicos al atenuar su nitidez. Por último, se puede observar otras fallas igualmente activas al norte de la falla de El Pilar, identificadas en sus extremos como F y que dislocan también los reflectores y el piso marino, pero en menor cuantía; muy visibles en las líneas 17 y 18 pero menos evidentes en la línea 20. Estas discontinuidades no presentan gas asociado. Aunque aparentadas a la falla de El Pilar, no guardan mayor relevancia a los fines de este trabajo.

Discusión

El levantamiento sísmico de alta resolución realizado a través de la falla de El Pilar, en su porción submarina del golfo de Cariaco, muestra que no está constituida por una traza única; mas bien está secionada, presentando solapes transpresivos o transtensivos, a semejanza de lo que la falla de El Pilar muestra a escala más regional, con la presencia de curvaturas o relevos compresivos (Beltrán *et al.*, 1996; Audemard, 2006), tales como los lomos o colinas de presión (*pop-up*) de dimensiones muy variables, entre pocos hm y algunos km, de Caiguire (Cumaná), Las Manoas (Cariaco) y Guarapiche, así como curvaturas o relevos transtensivos, de los que el ejemplo más notorio es la fosa de Cariaco, limitada por las fallas de San Sebastián al Norte y El Pilar al Sur (Audemard *et al.*, 2000; Figura 1). Muy particularmente, este estudio evidencia que la depresión submarina de Guaracayal, detectada por Caraballo (1982) en su estudio morfológico del fondo marino del golfo de Cariaco, está limitada por dos trazas subparalelas de la falla de El Pilar.

De igual manera, se aprecia una excelente coincidencia entre los escarpes de falla en el lecho marino que definen la geometría elongada este-oeste de la depresión (Figuras 2, 4 y 5), y la presencia de fallas subverticales de igual orientación que afectan todo el relleno sedimentario del golfo, visualizado en las líneas provistas en la Figura 4. Por otra parte, el engrosamiento de la secuencia por debajo de la depresión y entre ambas trazas significa que la actividad de la falla de El Pilar ha controlado localmente la sedimentación (actividad tec-

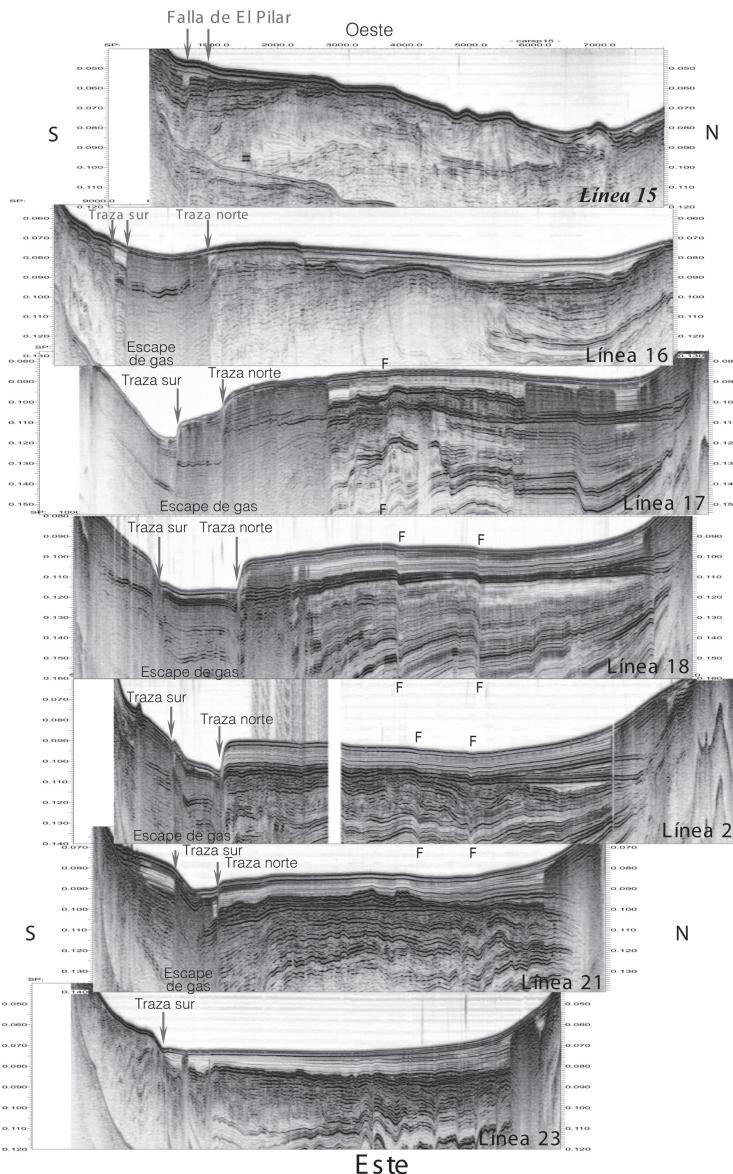


Figura 4. Serie de líneas sparker de orientación norte-sur transversas al golfo de Cariaco, dispuestas de oeste a este, mostrando las trazas de la falla de El Pilar en la cuenca en tracción de Guaracayal y alrededores. Otras fallas, ubicadas al Norte de la traza activa principal de la falla de El Pilar e indicadas por F en sus extremos, muestran actividad tectónica reciente.

tónica sinsedimentaria). También se puede inferir, a partir de la actual existencia de la depresión de Guaracayal en el fondo plano del golfo de Cariaco, que el aporte de sedimentos dentro de la cuenca de este golfo, en la vecindad de la depresión de Guaracayal, es deficitaria con respecto a la tasa de movimiento vertical local, con componente normal, introducida por la falla de El Pilar. Aunque conocida como una falla dextral por lo esencial a escala regional, muy localmente como en el caso que nos compete, la falla de El Pilar puede mostrar significativa componente vertical normal de movimiento. En consecuencia, se deduce que la falla de El Pilar presenta un arreglo de trazas dispuestas en solape dextro a partir de la conjunción de las observaciones de una depre-

sión batimétrica elongada con una relación de largo-ancho de 4:1, de escarpes tectónicos este-oeste a lo largo de márgenes norte y sur de la depresión, de fallas subverticales activas a la vertical de los escarpes morfológicos submarinos, y de actividad tectónica sinsedimentaria con engrosamiento de la secuencia bajo la depresión submarina. Por ende, cabe interpretar que esta depresión es una cuenca en tracción (*pull-apart basin*) activa (Figuras 2-5), a semejanza a las descritas por Aydin y Nur (1981) o a las modeladas por Dooley y McClay (1997) con un solape a 150°.

Por otra parte, la disposición geométrica deducida para la traza activa de la falla de El Pilar puede explicar el comportamiento sísmico mostrado por esta falla en su tramo del golfo de Cariaco en tiempos históricos y contemporáneos. Es decir, los sismos de 1797 y 1929, de magnitud similar (Ms 6,0-6,5) y con epicentro próximo a Cumaná, deben haber ocurrido sobre la traza norte de la cuenca en tracción de Guaracayal, mientras que los sismos de 1684 y 1997, con magnitudes Ms ~7, son responsabilidad de la traza sur de la falla de El Pilar, que se extiende entre el sur de la depresión de Guaracayal y la curvatura Casanay-Guarapiche (Figura 5).

No obstante, este comportamiento sísmico registrado en ya dos ocasiones no excluye que un sismo mayor sea producto de la ruptura de ambas trazas contiguas, haciendo caso omiso de la presencia de la cuenca en tracción de Guaracayal. Más aún, este tipo de barrera geométrica a la propagación de la ruptura podría ser el foco de ese evento más grande, tal como fuera adelantado por Soulás (1988).

En términos del potencial sismogénico de ambas secciones de la falla de El Pilar identificadas en el golfo de Cariaco, es posible señalar de manera preliminar que la traza activa al norte de la depresión de Guaracayal, de ~30km de longitud, es capaz de generar sismos de magnitud

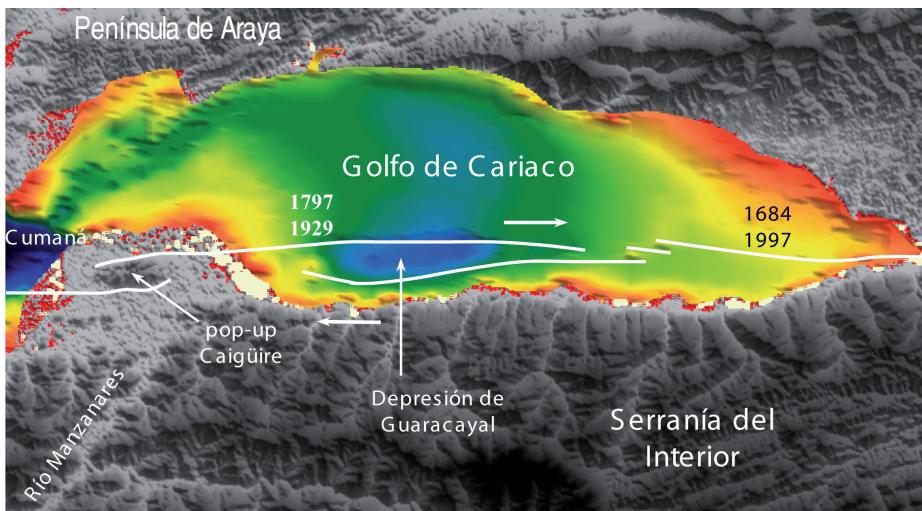


Figura 5. Interpretación estructural de la traza submarina de la falla de El Pilar en el golfo de Cariaco, plasmada sobre batimetría extraída de Global Mapper. Nótese las complicaciones estructurales que introducen modificaciones topográficas, en particular en la depresión de Guaracayal. A cada traza se adjudican los sismos correspondientes a los dos últimos ciclos sísmicos, identificados por su año de ocurrencia.

próximos a Ms 6 cada 130 años, mientras la traza sur, de ~60km, produce eventos de magnitud próximos a 7 cada 300-320 años.

Conclusiones

La depresión de Guaracayal, con dimensiones de unos 8km de largo en la dirección este-oeste, 2km de ancho y 15m más profunda que el fondo circundante relativamente plano del sector central del golfo de Cariaco, es una cuenca en tracción (*pull-apart basin*), producto de un relevo transtensivo, asociado a un solape dextro de la traza de la falla dextral de El Pilar. Esta interpretación se fundamenta en la relación de forma de la depresión de Guaracayal y su orientación, en la presencia de escarpes tectónicos este-oeste en sus márgenes norte y sur, coincidentes con fallas activas en el subsuelo de igual orientación, y en el claro carácter sintectónico de la sedimentación entrampada dentro de la cuenca de Guaracayal, entre ambas trazas de la falla de El Pilar. En consecuencia, la presencia de la cuenca en tracción de Guaracayal permite justificar el comportamiento sísmico del tramo de la falla de El Pilar entre Cumaná y Casanay. Este comportamiento se caracteriza en que la falla de El Pilar, en su tramo entre los cerros de Caigüire (Cumaná) al oeste y la población de Casanay en el este, ha requerido de dos sismos contiguos para completar la ruptura de su longitud total de ~80km, al menos en sus dos últimos ciclos sísmicos.

El primer ciclo, ocurrido en tiempos históricos, está conformado por dos eventos, uno en la porción más oriental de este segmento, ocurrido en 1684 y cuya ruptura cósica fue precisada con base en excavaciones paleosísmicas en el sector te-

rrestre de este segmento (entre Terranova y Guarapiche, región central del estado Sucre), y un segundo sismo que afectó esencialmente a la ciudad de Cumaná en 1797, como se dedujo a partir de las descripciones y daños de la época.

El segundo ciclo lo conforman dos eventos del s. XX, ocurridos el 17/01/1929 y el 9/07/1997. El sismo de 1929 ocurrió justo al este del casco antiguo de Cumaná, en el sector conocido como Punta Delgada, por haberse observado rupturas de superficie cósicas en las salinas costeras, teniendo una longitud total de ruptura no mayor a 30km y una magnitud inferior a Mw 6.7. Por su parte, el sismo de Cariaco de 1997 de Ms 6,8 rompió la superficie del terreno entre Villa Frontado y Casanay, en la prolongación hacia el este del golfo de Cariaco, sobre una longitud de 36km. No obstante, de las réplicas más someras de dicho evento se pudo establecer que dicha ruptura, aunque submarina, debía prolongarse hacia el oeste, dentro del golfo de Cariaco, hasta San Antonio del Golfo-Marigüitar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a André Singer y Rogelio Altez, y a toda la tripulación del B/O Guaiquerí II (Sergio Valenzuela, José Miguel Ramírez, Marcos Gutiérrez, Lisandro Gutiérrez, Ventura Hernández, Justino Alemán y Miguel Ángel Ramírez), así como a RCMG-Université de Gent, LGCA-Université de Savoya, FUNVISIS y CAMUDOCA, que permitieron el desarrollo de este estudio. Los fondos para su realización fueron aportados por el programa francés DyETI, el LGCA y FUNVISIS, y por una subvención de CAMUDOCA. Los resultados presen-

tados están enmarcados en los Proyectos ECOS Nord PI-2003000090 y FONACIT-2002000478 (Geodinos).

REFERENCIAS

- Audemard FA (1993) *Néotectonique, Sismotectonique et aléa Sismique du Nord-ouest du Venezuela (Système de failles d'Oca-Ancohón)*. Tesis. Univ. Montpellier II, Francia. 369 pp.
- Audemard FA (1998) Evolution Géodynamique de la Façade Nord Sud-américaine: Nouveaux apports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Vénézuela. *Proc. XIV Caribb. Geol. Conf. Trinidad-1995*, 2: 327-340.
- Audemard FA (1999a) El sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997, edo. Sucre, Venezuela: nucleación y progresión de la ruptura a partir de observaciones geológicas. *Mem. VI Cong. Venez. Sismología e Ingeniería Sísmica*. Mérida, Venezuela (CD-Rom).
- Audemard FA (1999b) Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar, Venezuela nororiental, a partir de primeros resultados paleoseísmicos. *Mem. VI Cong. Venez. Sismología e Ingeniería Sísmica*. Mérida, Venezuela (CD-Rom).
- Audemard FA (2006) Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 Earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. *Tectonophysics* 424: 19-39.
- Audemard FA (2007) Revised seismic history of El Pilar Fault, Northeastern Venezuela, after the Cariaco 1997 Earthquake and from recent preliminary paleoseismic results. *J. Seismol.* 11: 311-326.
- Audemard FA, Machette M, Cox J, Hart R, Haller K (2000) *Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions*. U.S. Geological Survey Open-File-Report 00-18. 79 pp.
- Audemard FA, Romero G, Rendón H, Cano V (2005) Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from microtectonic data and focal mechanism solutions. *Earth Sci. Rev.* 69: 181-233.
- Aydin A, Nur, A (1981) Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics* 1: 91-105.
- Baumbach M, Grosser H, Romero G, Rojas J, Sobiesiak M, Welle W (2004) Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela. *Tectonophysics* 379: 1-23.
- Beltrán C (1994) Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000. *Mem. VII Cong. Venez. Geofísica*. Caracas, Venezuela. pp. 541-547.
- Beltrán C, Giraldo C (1989) Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela. *Memorias VII Congreso Geológico Venezolano*, Barquisimeto, 3: 999-1021.
- Beltrán C, Singer A, Rodríguez JA (1996) The El Pilar fault active trace (Northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. *Proc. 3rd Int. Symp. on Andean Geodynamics*. Saint-Malo, France. pp. 153-156.
- Caraballo LF (1982) El golfo de Cariaco. Parte 1: Morfología y batimetría submarina. Estructuras y tectonismo reciente. *Bol. Inst. Oceanogr. Uni. Oriente* 21: 13-35.
- Dooley T, McClay K (1997) Analog modeling of pull-Apart Basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 81: 1804-1826.

- FUNVISIS (1994) *Estudio Neotectónico y de Geología de Fallas Activas de la Región Nororiental de Venezuela*. 3 Vols. Proyecto Intevep 92-175. Informe de Funvisis para Intevep S.A.
- FUNVISIS (2007) *Catálogo sismológico de Venezuela, 1910-presente* (formato digital).
- Gómez JM (1990) *Historia de las fortificaciones de Cumaná*. 1º ed. Talleres de Impresos Oriente, Cumaná.
- Grases J, Altez R, Lugo M (1999) *Catálogo de sismos sentidos o destructores. Venezuela. 1530-1998*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales / Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela / Editorial Innovación Tecnológica. Caracas, Venezuela. 654 pp.
- Mocquet A, Beltrán C, Lugo M, Rodríguez JA, Singer A (1996) Seismological interpretation of the Historical data related to the 1929 Cumaná earthquake, Venezuela. *Proc. 3rd Int. Symp. on Andean Geodynamics*. Saint-Malo, France. pp. 203-206.
- Paige S (1930) The Earthquake at Cumaná, Venezuela. January 17, 1929. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 20: 1-10.
- Pérez O, Aggarwal Y (1981) Present-day tectonics of southeastern Caribbean and northeastern Venezuela. *J. Geophys. Res.* 86: 10791-10805.
- Pérez O, Bilham R, Bendick R, Hernández N, Hoyer M, Velandia J, Moncayo C, Kozuch M (2001) Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia* 26: 69-74.
- Rod E (1956a) Earthquakes of Venezuela related to strike slip faults? *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 40: 2509-2512.
- Rod E (1956b) Strike-slip faults of northern Venezuela. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 40: 457-476.
- Schubert C (1984) Basin formation along Bocón-Morón-El Pilar fault system, Venezuela. *J. Geophys. Res.* 89: 5711-5718.
- Singer A, Audemard FA (1997) Aportes de Funvisis al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleoseismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. En Grases J (Ed.) *Diseño sismorresistente. Especificaciones y criterios empleados en Venezuela*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas, Venezuela. Vol. 33: 25-38.
- Soulas JP (1986) Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas. *Mem. VI Cong. Geol. Venez.* Caracas, Venezuela, 1995. Vol. 10: 6639-6656.
- Soulas JP (1988) Critères néotectoniques de segmentation des failles actives permettant l'évaluation de leurs séismes maximums probables. Exemples au Vénézuéla. *Coll. Int. Méthodologie et Applications de la Néotectonique*. Orléans, Francia. p. 4445 (Abstract).
- Stephan JF (1982) Evolution géodinamique du domaine Caraïbe, Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla). Tesis. Univ. París VI. París, Francia. 512 pp.
- Weber J, Dixon T, DeMets C, Ambeh W, Jansma P, Mattioli G, Saleh J, Sella G, Bilham R, Pérez O (2001) GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*, 29: 75-78.

THE UNDERWATER DEPRESSION OF GUARACAYAL, ESTADO SUCRE, VENEZUELA: A BARRIER TO THE PROPAGATION OF THE COSEISMIC BREAK ALONG THE EL PILAR FAULT

Franck Audemard, Christian Beck, Jasper Moernaut, Koen De Rycker, Marc De Batist, Javier Sánchez, Moralis González, Cristhian Sánchez, Willem Versteeg, Gustavo Malavé, Michael Schmitz, Aurélien Van Welden, Eduardo Carrillo and Andrés Lemus

SUMMARY

The underwater Guaracayal depression, in the Cariaco gulf, Sucre state, Venezuela, was first mapped from a bathymetric survey performed in the 80's. A high resolution reflection seismic survey, acquired with the Venezuelan R/V Guaiquerí II in the Cariaco gulf in early 2006, reveals that this depression is an active pull-apart basin on the submarine trace of the right-lateral strike-slip El Pilar fault, based on its geometry and the freshness of the sea-bottom fault scarps. The Guaracayal basin floor is ~15m deeper than the 80m deep flat bottom of the central sector of the gulf. This small pull-apart basin, which is about 8km long in east-west direction and 2km across, lies inside a dextral trans-

tensive overlap of the El Pilar fault submarine trace, which cuts in two parts what was proposed before as a unique fault segment extending between Cumaná and Casanay-Guarapiche. This 2km-apart stepover may be a sufficient barrier to fault rupture propagation, as evidenced by contemporary and historical seismicity. Accordingly, this geometry may explain by itself the seismogenic segmentation exhibited by the 80km long fault section extending between Cumaná and Casanay during at least the last two seismic cycles in west-east direction (1797-1684 and 1929-1997). However, this behaviour does not preclude that the whole Cumaná-Casanay segment may break at once in the future.

A DEPRESSÃO SUBMARINA DE GUARACAYAL, ESTADO SUCRE, VENEZUELA: UMA BARREIRA PARA A PROPAGAÇÃO DA RUPTURA COSÍSMICA AO LONGO DA FALHA DE “EL PILAR”

Franck Audemard, Christian Beck, Jasper Moernaut, Koen De Rycker, Marc De Batist, Javier Sánchez, Moralis González, Cristhian Sánchez, Willem Versteeg, Gustavo Malavé, Michael Schmitz, Aurélien Van Welden, Eduardo Carrillo e Andrés Lemus.

RESUMO

A depressão de Guaracayal, no golfo de Cariaco, estado Sucre, Venezuela, foi inicialmente reconhecida a partir de um levantamento batimétrico realizado na década dos oitenta. Um levantamento de sísmica de superfície de alta resolução adquirido no golfo de Cariaco a bordo do B/O Guaiquerí II em janeiro de 2006 revelou que esta depressão resulta ser uma bacia em tração ativa (“active pull-apart basin”) sobre a zona de cisalhamento activa submarina da falha dextral de “El Pilar”, por sua geometria e o fresco e proeminente das escarpas de falhas que a limitam. Esta bacia, com uma profundidade de águas de ~15m maior que o fundo plano localizado a uns -80m, mede aproximadamente 8km de longitude em direção leste-oeste e uns 2km transversalmente. A bacia se forma em um relevo dextro, quer

dizer transtensivo, da zona de cisalhamento submarina da falha de “El Pilar”, que secciona em duas porções o proposto anteriormente como um único segmento de falha com extensão entre Cumaná e Casanay-Guarapiche. Esta separação entre ambas as zonas de cisalhamento de 2km parece ser suficiente barreira para a propagação lateral da ruptura sísmica, tal como o evidencia a sismicidade contemporânea e histórica. O trecho de falha Cumaná-Casanay, de uns 80km de longitude, tem requerido em duas ocasiões da conjunção de dois sismos contíguos em direção oeste-leste (1797-1684 e 1929-1997) para romper-se na sua totalidade. Não obstante, não se exclui a possibilidade de um evento que rompa toda a extensão do segmento, a pesar de este comportamento sísmico reiterado.