



VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

Eventuales deformaciones permanentes de origen cosísmico en un área costera ubicada al SW de Güiria, estado Sucre: evaluación preliminar

Franck A. Audemard¹, Raymi A. Castilla² & Gustavo Malavé³

¹faudemard@funvisis.org.ve; ²rcastilla@funvisis.org.ve; ³malaveg@pdvsa.com

^{1,2}Dpto. de Ciencias de la Tierra, FUNVISIS, El Llanito, Caracas.

³Dpto. de Tecnologías de Infraestructura, PDVSA-INTEVEP, Los Teques, Edo. Miranda.

RESUMEN

Se presentan las eventuales deformaciones permanentes de origen cosísmico identificadas en un área costera ubicada al SW de Güiria, entre las poblaciones de Río Salado al este y Yoco al oeste, en la Península de Paria, estado Sucre. A tal fin, se evaluó la existencia de posibles fallas activas de sitio en la parcela preseleccionada, ubicada en proximidad al aeropuerto de la población de Güiria. Adicionalmente, se estudiaron las inmediaciones de la zona mencionada en un radio próximo a los diez kilómetros. Igualmente, se prestó particular atención a las deformaciones permanentes indirectas asociadas a la actividad sísmica (evidencias geológicas de licuación de suelos y de inestabilidad de laderas).

A partir de la integración de información de fuentes muy diversas –tales como: interpretación fotogeológica, observaciones y mediciones geológicas de campo (incluyendo el inventario de las deformaciones cuaternarias en distintos afloramientos en sedimentos de las formaciones Güiria y Río Salado atribuidas al Plio-Pleistoceno), interpretación de líneas sísmicas y análisis sismotectónicos del área del Golfo de Paria; el todo complementado con la información ya existente-, se identificaron las estructuras activas o potencialmente activas presentes en el área y se estimó su potencial sismogénico. De esta integración, se interpretaron tres estructuras frágiles principales activas, asociadas a alineamientos de rasgos topográficos, que limitan bloques estructurales basculados al este. Estas estructuras de rumbo NNW-SSE constituyen fallas normales en la terminación en *cola de caballo* de una estructura mayor transcurrente dextral, que se extiende costafuera y cuya expresión superficial se puede observar en la depresión de Yoco.

De los 37 datos microtectónicos de planos de falla medidos, 19 aportaron suficiente información para el cálculo de tensores de esfuerzos por métodos de inversión automatizados, generándose así dos estaciones microtectónicas en las cercanías de Yoco. De esta manera, se obtuvo un tensor de esfuerzos que responde al estado regional reportado por otros autores (esfuerzo horizontal máximo orientado NNW-SSE y esfuerzo intermedio en posición vertical), y otro que corresponde a condiciones locales (extensión por flexión apical en pliegues), producto de la deformación asociada a pliegues en la terminación de la falla principal.



Las evidencias recabadas y analizadas son suficientes para afirmar la existencia de deformaciones cosísmicas directas e indirectas en el Cuaternario y la presencia de fallas capaces. Por ende, es imperiosa la necesidad de estimar las deformaciones permanentes inducidas para cualquier proyecto de infraestructura que se quiera desarrollar en la región.

INTRODUCCIÓN

Las deformaciones permanentes –directas o indirectas- del terreno asociadas a la ocurrencia de sismos, son uno de los efectos que deben ser estimados en cualquier proyecto que amerite la realización de un estudio de amenaza sísmica. Las deformaciones directas asociadas con la ruptura cosísmica de la(s) estructura(s) que origina el evento pueden causar graves daños debido a los desplazamientos que induce en la infraestructura apostada a lo largo del rasgo estructural en cuestión. Por esta razón, el mapeo y caracterización sísmogénica de todas y cada una de las fallas capaces de producir deformaciones permanentes, es un paso indispensable en el diseño de cualquier proyecto de infraestructura en regiones con actividad sísmica.

En el caso aquí presentado se ha hecho necesario evaluar la existencia de posibles fallas de sitio activas en los alrededores de la población de Güiria. Para tal fin, se evaluaron las inmediaciones de dicha población en un radio próximo a diez kilómetros. Una vez determinada la existencia de dichas fallas activas, se calcularon las deformaciones cosísmicas que dichas estructuras pudiesen inducir a cualquier instalación proyectada.

La zona cubierta por este estudio se encuentra en la Península de Paria, Estado Sucre en las proximidades de la población de Güiria, entre las poblaciones de Río Salado al este y Yoco al oeste. La ubicación del área estudiada, así como de la parcela preseleccionada se muestran en la figura 1.

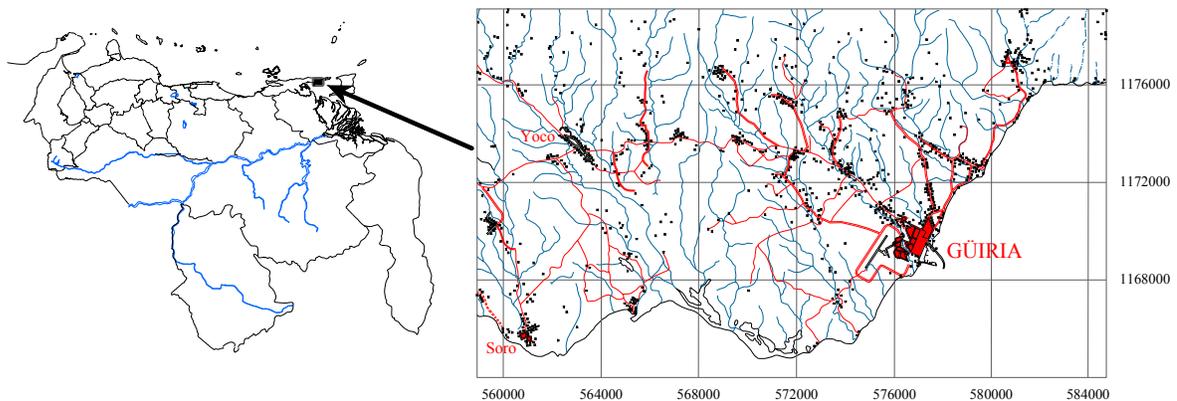


Figura 1. Ubicación del área de estudio.



VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

Diversos trabajos regionales en el campo de la sismotectónica y la geodinámica establecen el marco sobre el cual se basa la configuración estructural actual y local. Russo et al. (1993) observan que los mecanismos focales transcurrentes dextrales sobre fallas de rumbo E-W, están restringidos a una zona de 60 km de ancho entre el Golfo de Cariaco y el margen occidental del Golfo de Paria. Afirman también que la coexistencia de sismos someros en fallas inversas, normales y transcurrentes, puede ser la expresión de deformación compresiva oblicua no compartida (*unpartitioned*) en la zona del margen de placa. Pérez y Aggarwal (1981), con base en la distribución hipocentral de los sismos de la región nororiental venezolana, estiman que un marcado contraste de régimen tectónico tiene lugar a ambos lados de una línea imaginaria coincidente aproximadamente con la costa occidental del golfo de Paria, donde un “slab” de subducción se hunde hacia el NNW por debajo de Trinidad y la extremidad más oriental de la península de Paria y donde también coexisten sismos superficiales, mientras al oeste de dicha línea sólo ocurren sismos corticales. La profundidad de la actividad sísmica cortical, definida a partir de una campaña de microsismicidad (Intevp-CEE, 1993?), se limita sólo a los primeros 20 km, mientras que en la subducción han sido identificados sismos justo al norte de la península de Paria de profundidades de 120-150 km (catálogo FUNVISIS). Esto muestra la complejidad estructural y geodinámica que impera en la región oriental venezolana, en la cual se enclava nuestra zona de estudio.

A escala más local, Soulas et al. (1984), en el campo de la ingeniería de fallas activas, reporta una serie de lineaciones de orientación NW-SE en los sedimentos cuaternarios del sur de la península de Paria que representan la prolongación del tren de accidentes dextrales de Los Bajos-El Soldado.

Beltrán & Giraldo (1989) describen cómo la franja de deformación de unos 40 km de ancho, donde se concentra lo esencial del movimiento relativo entre las placas Caribe y Sudamérica, se abre a la altura de Güiría para formar una zona más ancha donde predominan el movimiento transcurrente dextral y direcciones NE-SW y NW-SE.

A continuación, se presentan los resultados y hipótesis planteados a partir de la interpretación fotogeológica, así como de las observaciones y medidas hechas en campo. Estas últimas se han dividido entre la información de origen estratigráfico y el inventario de las deformaciones en distintos afloramientos estudiados. También son presentados análisis sismotectónicos del área del Golfo de Paria complementados con la literatura existente. La integración de toda esta información fue realizada para estimar el potencial sismogénico de las estructuras presentes en el área.

METODOLOGÍA

El desarrollo del presente estudio se basó sobre dos actividades principales: 1) La interpretación fotogeológica y 2) El levantamiento en campo de un inventario de deformaciones. Ambas actividades persiguieron, a distintas escalas, la búsqueda de



evidencias de deformación frágil que guiaran a la identificación de fallas activas con potencial de afectar la zona de estudio.

La interpretación fotogeológica fue complementada con un análisis cualitativo de la red de drenaje a través de los mapas topográficos disponibles. Identificando lo que aquí se denominan *anomalías en la red de drenaje*, metodología que ha probado ser de suma utilidad como apoyo y/o complemento en la búsqueda de evidencias de actividad reciente en las estructuras.

El levantamiento sistemático de deformaciones frágiles observables en afloramientos, incluyó el examen de 16 km de acantilados costeros y 120 km de carreteras en los alrededores de la población de Güiria. Se realizaron aproximadamente 41 medidas microtectónicas tanto en fallas como en fracturas y un número similar de medidas de orientación de estratos. Algunas observaciones estratigráficas fueron necesarias para la mejor comprensión de la disposición y cronología de las deformaciones.

INTERPRETACIÓN FOTOGEOLOGICA

El análisis de la misión aerofotográfica 040282 a escala 1:30.000 ha permitido la identificación de diversas estructuras con evidencias geomorfológicas de actividad reciente. De igual modo, se han identificado alineaciones, que si bien no presentan evidencias claras de actividad, permiten complementar las interpretaciones realizadas. Un análisis cualitativo de la red de drenaje también ha permitido la precisión del carácter reciente en la deformación asociada a algunas estructuras.

Esta parte de la península se caracteriza por ser una zona "deprimida" respecto a las zonas circundantes. Con elevaciones medias entre 20 y 40 m y máximas alrededor de 100, esta zona contrasta con la Serranía de Paria al norte que alcanza los 800 m y las elevaciones al oeste de Yoco que circundan los 100 m de altura.

No obstante, el relieve presenta irregularidades que indican la presencia de estructuras con actividad reciente. Una serie de altos y depresiones topográficas alargados y orientados en dirección variable entre NNW-SSE y N-S presentan evidencias geomorfológicas de actividad reciente. La *depresión de Yoco*, tal y como se ha denominado en este trabajo, se encuentra en la posición más occidental de todas las estructuras identificadas. Se encuentra limitada al oeste por un desnivel en cuya extensión se pueden identificar escarpes de falla con alto grado de degradación y exposición al este. Dicho desnivel se encuentra alineado con la línea de costa entre la Ensenada de Guayabero y Punta Mata Redonda, siendo la forma de mayor extensión en el área.

Una serie de tres elevaciones alargadas también con orientaciones NNW-SSE y N-S, se pueden identificar al este de la depresión de Yoco. Todas ellas asociadas con basculamientos hacia el este en su lado oriental y algunos escarpes degradados de exposición oeste. Con estas características presentes se han interpretado bloques orientales



*VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.*
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

levantados y bloques occidentales deprimidos a uno y otro lado de cada una de estas elevaciones.

Otras alineaciones menores orientadas NW-SE ó NE-SW pueden observarse, algunas veces asociadas con facetas triangulares, tanto en la región costera como frente al piedemonte de la serranía.

Basculamientos no asociados a las alineaciones principales han sido identificados con vergencia al norte y frente al piedemonte de la serranía, lo que ha sido interpretado como el producto de la carga litostática que ejerce esta sobre los depósitos Plio-Pleistocenos del área. Esta característica, sumada a las múltiples y consistentes anomalías en la red de drenaje identificadas en el piedemonte permiten afirmar el carácter activo de este accidente, conocido como el corrimiento de Tunapuy (Fig. 4).

La distribución de las anomalías ha permitido discriminar segmentos de este accidente con cinemática ligeramente distinta. El segmento entre las poblaciones de El Hoyo y Quebrada de Agua con una cinemática ligeramente transcurrente, contrasta con el segmento entre Quebrada de Agua y Río Salado donde la componente inversa es claramente predominante. Estas diferencias inferidas a partir de las anomalías de drenaje concuerdan con los cambios geométricos en la traza y su relación con un tensor con esfuerzo máximo horizontal NW-SE.

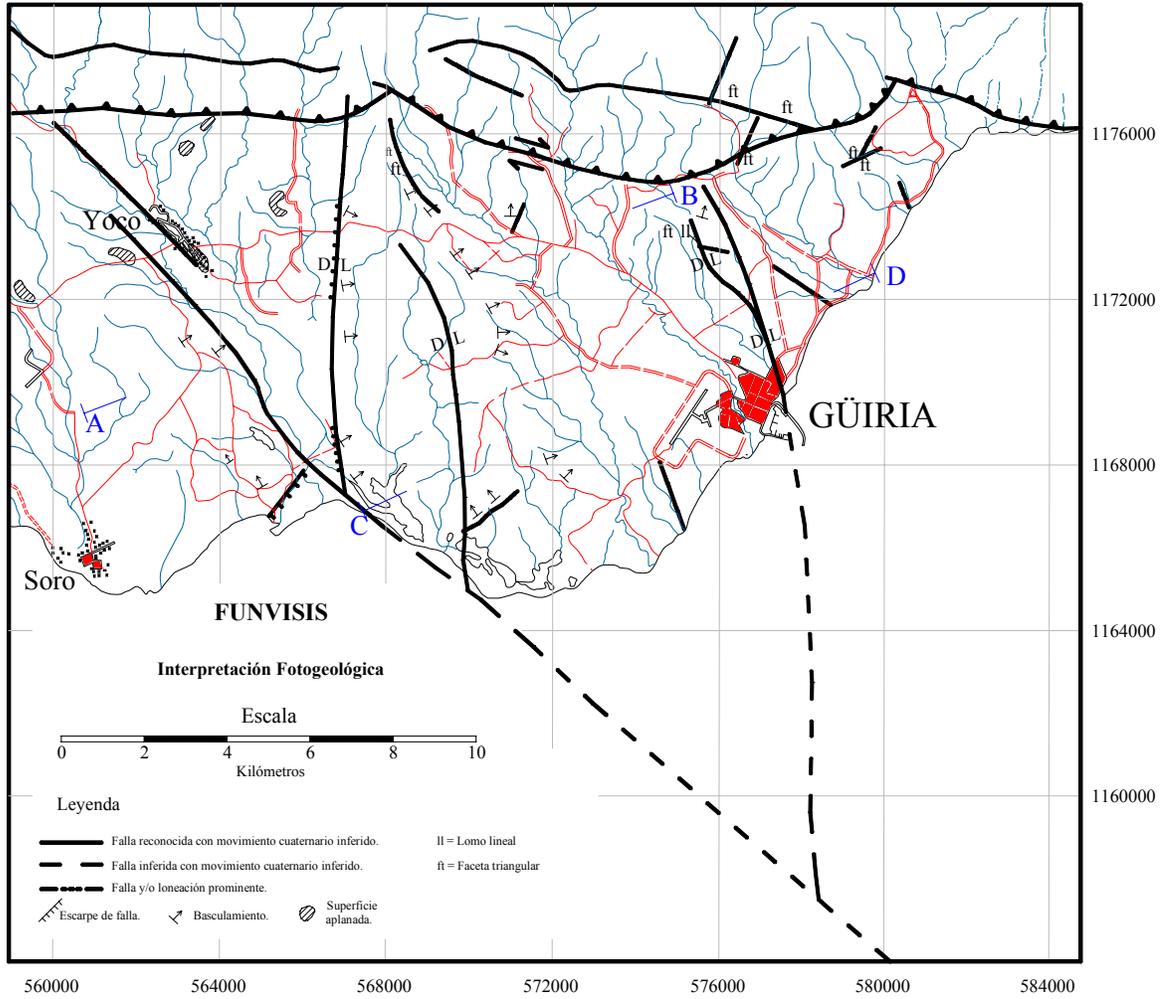


Figura 2. Resultado de la interpretación fotogeológica

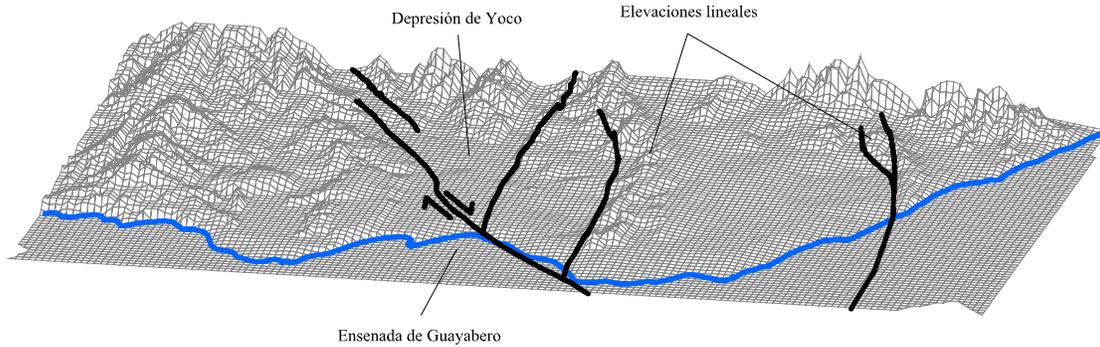


Figura 3. Modelo digital del terreno realizado con datos a escala 1:25000, mostrando las tres elevaciones NNW-SSE y N-S. Se puede observar cómo la presencia de la Ensenada Guayabero indica la continuidad en mar de la estructura que produce la depresión de Yoco. Escala vertical exagerada.

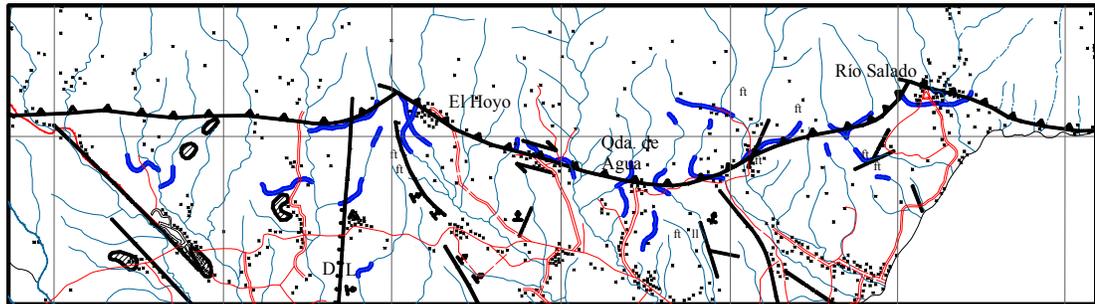


Figura 4. Mapa de las anomalías de drenaje interpretadas asociadas al Sistema Inverso de Tunapuy. En las cercanías del contacto entre las unidades metamórficas y la planicie aluvial, se identificaron deflexiones (cambios bruscos en el curso del río) y difluencias (abandono del curso natural y adaptación a uno nuevo o existente).

INVENTARIO DE LAS DEFORMACIONES

Sistema Inverso de Tunapuy

A lo largo del piedemonte meridional de la serranía de Paria se observa una serie de evidencias morfológicas que indican la presencia de una estructura inversa activa, ya descrita en FUNVISIS (1994) y Audemard et al. (2000). FUNVISIS (op. cit.). En dicha descripción se hace referencia a la escasa cantidad de evidencia neotectónica en el tramo entre Río Seco y Río Salado, razón por la cual se supone que la actividad de este tramo es



de menor importancia respecto del occidental (entre Los Arroyos y Río Seco) o que la traza activa ha migrado hacia el sur y costa afuera.

La interpretación de los patrones de drenaje en el tramo oriental ha permitido poner en evidencia una serie de anomalías en los cursos principales que descienden de la serranía. Dentro de las anomalías encontradas se incluyen curvaturas abruptas que conllevan a la formación de goteras tectónicas, difluencias y deflexiones (Fig. 4), todas indicativas de la presencia de una estructura inversa de bajo ángulo con actividad reciente (Audemard, 1999). Por otro lado, la existencia de depósitos piemontinos pleistocenos (Fm. Río Salado) basculados hacia el norte en ángulos variables entre 3° y 5°, es evidencia de la imposición de una carga tectónica proveniente del norte y posterior a la sedimentación.

Ubicación	Coordenadas	Orientación	Estría	Movimiento	Estación
* Carretera Güiria-Macuro.	E588575; N1176095	N85 51N	75W	Inverso-Dextral	---
* La Horqueta. NW de Yoco	E559843; N1176164	N67 81S	9W	---	---
Sur de Maraval	E547372; N1175560	N100 36N	80W	Inverso-Dextral	---

* Fallas dentro de unidades metamórficas

Tabla 1. Datos microtectónicos de estructuras asociadas al frente inverso de Tunapuy en la zona comprendida entre Güiria e Irapa.

Sumado a esto, se encontraron una serie de afloramientos con evidencias de deformación frágil de tipo inverso en depósitos pleistocenos (Fig. 5 y Tabla 1), lo que constituye otra evidencia de la existencia del accidente inverso en tierra con actividad reciente. Este tipo de deformación también se encontró en unidades metamórficas cercanas a la planicie aluvial.



Figura 5. Afloramiento con deformación frágil en las cercanías de la población de Maraval al NW de Güiria. Las fallas inversas conjugadas (indicadas en negro) se encuentran basculadas hacia el ENE junto con la secuencia sedimentaria correspondiente a la Fm. Río Salado. Falla de la izq.= N100 36 N. Estría=80W. Estratificación= N175 10E. Ubicación= E547372; N1175560

Noreste de Güiria



En la zona al noreste de Güiria se advierte la existencia de una serie de lomos en orientación N135 que controlan la red de drenaje. Estos lomos, con expresión en los acantilados costeros, corresponden a cuestras monoclinales de la Fm. Río Salado que buzan al norte y que por lo general están limitadas en su parte meridional por fallas normales.

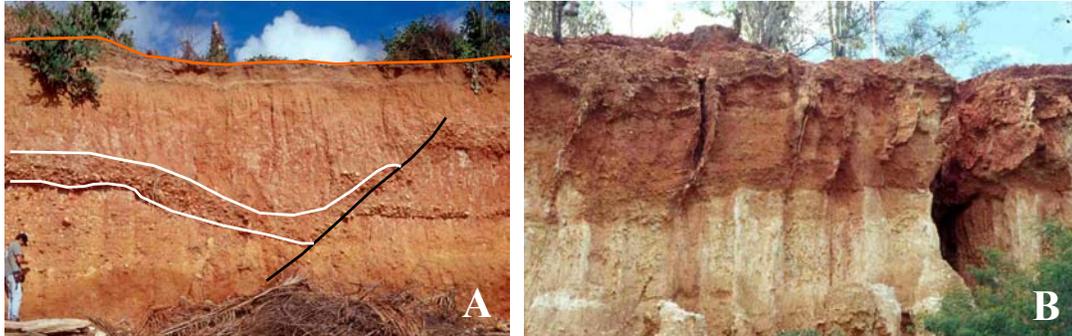


Figura 6.A. Falla normal en acantilado costero al NE de La Salina (Negro). El pliegue "rollover" se observa tanto en el estrato conglomerático (Blanco) como en la superficie topográfica (Naranja).
Falla= N137 73S; Estria= 65E; Ubicación= E580110; N1173293.

Figura 6.B. Fallas sigmoidales distensivas con desarrollo evidente en el estrato rojizo, aunque su continuidad se puede seguir en el inferior más claro.

Dichas fallas normales deforman sedimentos de la Fm. Río Salado en los acantilados costeros al NE de la población Las Salinas (Fig. 6.A; y Tabla 2). La formación de pliegues *rollover*, con expresión tanto en los estratos conglomeráticos como en la superficie topográfica, permite concluir que éstas son estructuras de cierta complejidad geométrica y con actividad reciente.

De igual modo, fallas normales con geometría sigmoidal y de longitudes y desplazamientos diversos se observan en el tope de un afloramiento en la vía hacia Río Salado (Fig.6B y Tabla 2). El rumbo de estas estructuras es variable entre N120 y N140, valores cercanos a los de las lineaciones antes descritas.

Ubicación	Coordenadas	Orientación	Estria	Movimiento	Estación
Acantilados al NE de Las Salinas	E580110; N1173293	N137 73S	65E	Normal-Sinestral	---
NE de Las Salinas	E580785; N1174366	N120 85S	---	Normal	---
NE de Las Salinas	E580785; N1174367	N140 87N	---	Normal	---
NE de Las Salinas	E580785; N1174368	N140 80S	---	Normal	---
NE de Las Salinas	E580785; N1174369	N135 70S	---	Normal	---
NE de Las Salinas	E580785; N1174370	N140 58S	---	Normal	---



Tabla 2. Datos microtectónicos de deformaciones encontradas al NE de Güiria.

Suroeste de Güiria

Al suroeste de Güiria se realizó el levantamiento de tres acantilados costeros, el primero y más cercano a esta población se encuentra entre Pta. Güiria y Pta. Guaraguara, el segundo entre Pta. La Salineta y Pta. Mata Redonda, y el tercero y más oriental entre Pta. de Piedras y Pta. La Chica.

Punta Güiria - Punta Guaraguara; Punta La Salineta - Punta Mata Redonda

De todos los acantilados examinados, el que se encuentra entre Punta Güiria y Punta Guaraguara es el único donde la estratificación se mantiene horizontal y donde no se observan deformaciones frágiles. De altura variable entre 5 y 6 m, y con afloramientos tanto de la Fm. Río Salado como de la Fm. Güiria, este acantilado goza de gran estabilidad a todo lo largo de su extensión (Fig. 7).



Figura 7. Sector del acantilado entre Punta Güiria y Punta Guaraguara.

El acantilado entre Punta La Salineta y Punta Mata Redonda, al igual que el anterior, carece de deformaciones frágiles de importancia o basculamiento general de los estratos. Con tan solo 2,5 a 3 m de alto, sólo presenta afloramientos de la Fm. Río Salado, donde se observaron grietas con características de inyectitas clásticas o diques de arena asociadas a licuación de sedimentos (Fig. 8).

Estas estructuras, aunque son las más confiables como indicadores de perturbaciones sedimentarias de origen sísmico, no permiten, por sí solas, establecer una relación directa con algún evento ocurrido en el pasado. Una amplia distribución de perturbaciones sedimentarias correlacionables en una zona es la primera condición que debe cumplirse para realizar estimados de este tipo, requisito que no se cumple en la zona estudiada.



Figura 8. Inyectita clástica y deformaciones dúctiles en los sedimentos de la Fm. Río Salado. Acantilado entre Pta. La Salineta y Pta. Mata Redonda.

Punta de Piedras - Punta La Chica

A diferencia de la mayoría, este acantilado presenta extensos afloramientos de arcillas de la Fm. Güiría, razón por la cual un gran porcentaje de la extensión de afloramiento se encuentra mal preservado. Hacia la parte oriental del acantilado, en las cercanías de Pta. de Piedras, afloramientos de hasta 15 m de altura presentan niveles de degradación que dificultan la identificación de deformaciones. No obstante, es uno de los más abundantes en deformaciones frágiles con un total de doce fallas en depósitos Pleistocenos, la mayoría de ellas concentradas hacia la parte occidental (dentro o en las cercanías de afloramientos de la Fm. Río Salado) con desplazamientos decimétricos y orientaciones variables (Fig. 9 y Tabla 3).

Coordenadas	Orientación	Estría	Movimiento	Estación	ID
E564539; N1166738	N95 55N	---	Normal	---	---
E564539; N1166739	N100 64S	---	Normal	---	---
E563767; N1166211	N65 50N	63N	Normal-Dextral	Pta. De Piedras	1
E563767; N1166212	N67 46N	70N	Normal-Dextral	Pta. De Piedras	2
E563767; N1166213	N65 53N	70N	Normal-Dextral	Pta. De Piedras	3
E563767; N1166214	N90 45N	---	Normal	Pta. De Piedras	---
E563767; N1166215	N95 48N	---	Normal	Pta. De Piedras	---
E562866; N116540S	N125 70S	---	---	Pta. De Piedras	---
E562866; N116540S	N98 60S	55E	Normal-Sinistral	Pta. De Piedras	4
E562712; N1165223	N100 75N	78E	Normal-Dextral	Pta. De Piedras	---



*VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.*
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

E562712; N1165224	N80 67N	80E	Normal-Dextral	Pta. De Piedras	5
E562712; N1165225	N130 84S	---	---	Pta. De Piedras	---
E562771; N1165232	N120 62S	10E	Dextral-Inverso	Pta. De Piedras	6
E562718; N1165239	N120 65S	15E	Dextral-Inverso	Pta. De Piedras	7
E562723; N1165248	N112 52S	---	---	Pta. De Piedras	---
E562723; N1165249	N126 70S	90	Normal puro	Pta. De Piedras	---
E562723; N1165250	N120 64N	65W	Normal-Sinestral	Pta. De Piedras	8
E562723; N1165251	N110 79S	49E	Normal-Sinestral	Pta. De Piedras	9

Tabla 3. Datos microtectónicos de las deformaciones analizadas entre Pta. de Piedras y Pta. La Chica.



Figura 9. Planos de falla bien definidos dentro de la Fm. Güiria con desplazamiento normal-dextral. Se midieron alrededor de cuatro orientaciones en planos distintos (ver Tabla 1). Ubicación = E563767; N1166211.

El levantamiento del acantilado al occidente de Punta de Piedras permitió la medición de 18 planos de falla, once de los cuales pueden ser usados para el cálculo de tensores de esfuerzos por métodos de inversión. El cálculo definitivo se realizó con 7 planos de falla, que permitieran obtener un tensor confiable tal y como lo muestran el histograma de desviaciones angulares y el círculo de Mohr (Figs. 10 C y D).

Los resultados muestran un tensor con el esfuerzo máximo (σ_1) en posición subvertical y los esfuerzos medio y mínimo (σ_2 y σ_3) en posición horizontal. Adicionalmente estos últimos presentan magnitudes similares entre sí, produciendo una extensión radial que puede observarse en la distribución del rumbo de las fallas en la estación, con una variación de hasta 60° . Las orientaciones de los esfuerzos dentro del tensor son, para σ_1 014/67, para σ_2 267/07 y para σ_3 174/22. La relación de esfuerzos es equivalente a 0.0811, lo que indica que $\sigma_2 \approx \sigma_3$, resultando así en una distensión radial.



PUNTA DE PIEDRAS

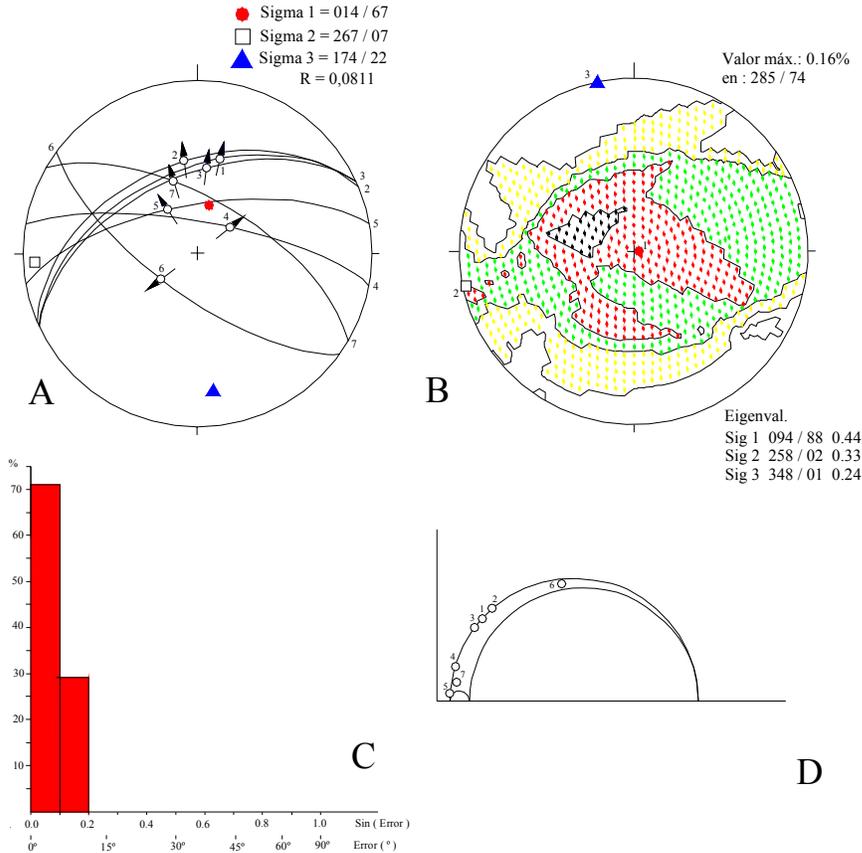


Figura 10. Resultados de la estación microtectónica de Punta de Piedras. A) Diagrama de Angelier con el tensor de esfuerzos calculado por medio del método de Etchecopar. B) Tensor de esfuerzos calculado por el método de diedros rectos. C) Histograma de desviaciones angulares entre estrías teóricas y reales. D) Representación en círculo de Mohr de los planos de falla. Datos en la Tabla 3.

Tensores con estas características tienden a producir fallas normales con buzamientos alrededor de los 60° y rumbos distribuidos en todo el rango azimutal. Sin embargo, y debido a que σ_2 es todavía mayor que σ_3 , la mayoría de las fallas se orientarán de manera perpendicular a éste último, tal y como lo muestra la figura 10.A. Otra característica que resalta es que tanto para el caso de fallas neoformadas (fallas en rocas no pre-fracturadas) como para el caso de fallas heredadas (fallas que utilizan planos de debilidad pre-existent), este tensor de esfuerzos induce estrías de alto ángulo y que por lo tanto tienden a ser paralelas a la dirección de buzamiento del plano que las contiene.

Noroeste de Güiria

Entre las poblaciones de La Paloma y Yoco, se realizaron un total de 9 medidas microtectónicas sobre fallas en sedimentos recientes. Siete de las mismas se realizaron en la carretera hacia Río Arriba, con las cuales se estableció una estación microtectónica. De este total de mediciones, sólo 4 pudieron ser usadas para el cálculo de tensores (Fig. 11.A). En este caso es σ_2 el esfuerzo subvertical con orientación 027/68, σ_1 y σ_3 se orientan 147/11 y



*VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.*
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

241/19 respectivamente y están contenidos en un plano sub-horizontal inclinado hacia el suroeste. La relación de esfuerzos es de 0,7, indicando que la magnitud de σ_2 es relativamente alta y se encuentra cercana a la de σ_1 . Dicho tensor permite que la mayoría de las fallas se caractericen por estrías sub-paralelas al rumbo o con componente normal

Ubicación	Coordenadas	Orientación	Estría	Movimiento	Estación	ID
Oeste de Cerro del Diablo.	E566632; N1173572	N140 79S	9S	Dextral-Inversa	---	---
Carretera hacia Río Arriba.	E565756; N1174212	N90 36S	51E	Inverso-Dextral	Río Arriba	1
Carretera hacia Río Arriba.	E565755; N1174809	N150 90	90	Normal puro (bloque este baja)	Río Arriba	2
Carretera hacia Río Arriba.	E565755; N1174810	N125 27S	68W	Normal-Dextral	Río Arriba	3
Carretera hacia Río Arriba.	E565755; N1174811	N162 71S	---	Normal	Río Arriba	---
Carretera hacia Río Arriba.	E565733; N1174832	N150 30N	81E	Normal-Dextral	Río Arriba	4
Carretera hacia Río Arriba.	E565733; N1174833	N145 75S	---	---	Río Arriba	---
Carretera hacia Río Arriba.	E565733; N1174834	N144 54S	---	---	Río Arriba	---
La Horqueta. NW de Yoco.	E559843; N1176164	N67 81S	9W	---	---	---

Tabla 4. Datos microtectónicos de deformaciones analizadas en afloramientos al oeste de Güiría.



RIO ARRIBA

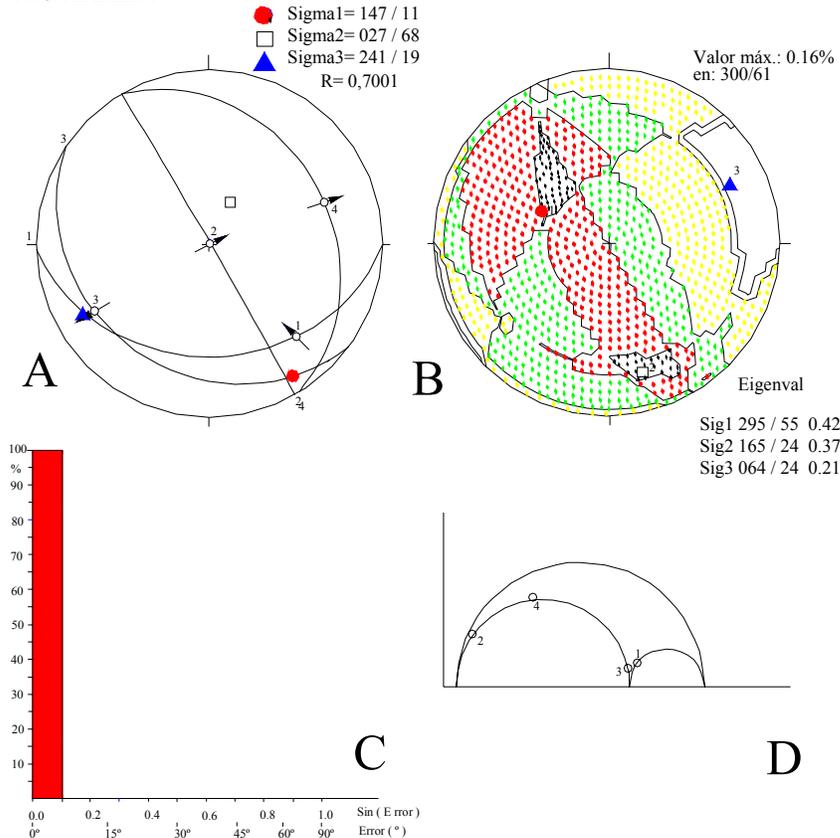


Figura 11. Resultados de la estación microtectónica de Río Arriba A) Diagrama de Angelier con el tensor de esfuerzos calculado por medio del método de Etchecopar. B) Tensor de esfuerzos calculado por el método de diedros rectos. C) Histograma de desviaciones angulares entre estrias teóricas y reales. D) Representación en círculo de Mohr de los planos de falla. Datos en la Tabla 4.

Los resultados obtenidos con el método de Etchecopar difieren notablemente de aquellos obtenidos con el método de diedros rectos (Fig. 11.B) debido a la poca cantidad de datos disponibles. El círculo de Mohr (Fig. 11.D) muestra un ajuste lejos de lo ideal, especialmente con los datos 1 y 3 para los cuales el esfuerzo cortante es casi nulo. Por esta razón se puede afirmar que dichos planos difícilmente "juegan" dentro de este tensor. Por otra parte, la confiabilidad de este tensor es baja por el pequeño número de planos de falla que satisfacen la solución obtenida.

IMPLICACIONES TECTÓNICAS DE LOS TENSORES DE ESFUERZOS

Los resultados de la inversión en la estación microtectónica de Río Arriba, muestran un tensor de esfuerzos que se corresponde con el tensor regional calculado por otros autores en la región nor-oriental de Venezuela (Beltrán y Giraldo, 1989). El esfuerzo medio en posición sub-vertical y el esfuerzo máximo (σ_1) orientado NNW-SSE en posición sub-horizontal, inducen un régimen que se repite de manera casi constante en esta región del país. La cercanía de esta estación al frente inverso E-W de Tunapuy apoya la existencia de



este estado de esfuerzos, pues en el mismo se han reconocido indicios de actividad compresiva-transcurrente.

El valor alto en la relación de esfuerzos ($R=0,7$) permite definir a este tensor como transcurrente-distensivo, resultado lógico para esta estación pues la misma se encuentra en una terminación en cola de caballo distensiva. Lo anterior permite deducir la existencia de un régimen transtensivo en los alrededores de esta estación, respuesta del estado de esfuerzos a una configuración local originada por la coexistencia de distintas estructuras.

Por otra parte, la estación de Punta de Piedras refleja un estado de esfuerzos distensivo con σ_1 en posición sub-vertical. El valor de la relación de esfuerzos ($R \approx 0$) establece una condición particular en el tensor, lo que permite la presencia de fallas normales con direcciones de rumbo distribuidas en un amplio rango azimutal, tal y como lo demuestran los datos (Fig. 10.A).

Con la ayuda de observaciones de campo, este estado conocido como distensivo radial, ha sido asociado con perturbaciones locales en el campo de esfuerzos. La generación de pliegues en la zona produce deformaciones distensivas en la parte externa de los estratos en lo que se conoce como deformación longitudinal tangencial. Dichas deformaciones producen estructuras distensivas que tienden a ser paralelas al eje del pliegue. En este caso particular el campo de esfuerzos local se combina con el campo regional para producir una permutación en las direcciones de esfuerzos principales por medio de cambios en las magnitudes relativas de los mismos, pues las direcciones que caracterizan al tensor se mantienen relativamente constantes.

Una disminución considerable en la magnitud del esfuerzo horizontal de orientación NNW-SSE, es capaz de producir los cambios necesarios en el tensor de esfuerzos regional y dar origen así al que se observa en la estación Punta de Piedras. La relación de magnitudes entre las otras direcciones de esfuerzo se mantiene constante, al menos de manera cualitativa. Esta interpretación apoya la tesis de la deformación longitudinal-tangencial en la parte externa de un pliegue orientado ENE aproximadamente. La extensión producida por este en dirección NNW contrarresta la compresión regional de orientación similar y produce un campo regional con las características antes descritas.

ESTIMADOS DE DESPLAZAMIENTOS COSÍMICOS

La gran cantidad de deformación frágil documentada en afloramientos cuaternarios permite inferir el carácter activo de las estructuras interpretadas en la región. Sin embargo, la identificación y caracterización de rupturas a lo largo de las trazas de estructuras mayores no fue posible. Usando las relaciones de Utsu & Seki (1954) y Aggarwal (1981), se pueden



VII Congreso Venezolano de Sismología
e Ingeniería Sísmica.
Barquisimeto, Venezuela, 12 al 14 de noviembre del 2003

calcular estimados para la magnitud (M_s) y el desplazamiento cosísmico asociados a la ocurrencia de un sismo en alguna de las estructuras con traza en tierra.

Las estructuras de buzamiento oeste presentan longitudes entre los 10 y 16 km, lo que produciría, para eventos someros ($\text{prof}=10$ km) sismos de magnitudes $M_s=6.0-6.3$, y desplazamientos cosísmicos entre 40 y 50 cm. No obstante, las relaciones estructurales indican que la actividad en estas fallas podría estar supeditada al comportamiento de la estructura mayor NW-SE, lo cual implicaría que todo el ciclo sísmico de acumulación y liberación de esfuerzos en las estructuras secundarias, estaría controlado por la actividad de la falla principal. De este modo, eventos asociados a las estructuras menores responderían a necesarios procesos de ajuste geométrico por problemas de espacio generados luego de períodos de actividad en la estructura mayor.

Dos modelos de configuración estructural de la zona del golfo de Paria son usados aquí para plantear escenarios posibles de ruptura en la falla mayor NW-SE y proponer así valores de deformación permanente en las estructuras en tierra que se observan en el área de estudio. El primero de estos modelos (Beltrán y Giraldo, 1989; Giraldo, 1993) muestra a la mencionada estructura mayor NW-SE como la prolongación en tierra del sistema de fallas de Los Bajos, cuya longitud total aproximada de 120 km podría producir un sismo $M_s=7.1$. El desplazamiento cosísmico asociado con este evento sería de unos 140 cm, que distribuido de manera uniforme entre las estructuras distensivas en la terminación norte produciría una deformación horizontal de 35 cm. Si suponemos que estas fallas normales poseen un buzamiento característico de 60° , el salto vertical podría ser estimado de manera aproximada en 60 cm, para cada una de ellas.

El segundo modelo considerado es el propuesto en Ysaccis (1997), donde es la estructura dextral del *Central Range* de Trinidad, la que se conecta con la falla NW-SE a través de una curvatura de 45° hacia el norte. En este escenario, una ruptura de 100 km de longitud podría ocurrir en el accidente dextral antes mencionado. Con una magnitud equivalente a $M_s=7.0$ y un desplazamiento cosísmico de 125 cm en sentido horizontal. La estructura mayor NW-SE en este modelo es una de las varias fallas distensivas que convierten el desplazamiento horizontal de los sistemas de El Pilar, *Central Range* y Los Bajos, en movimiento vertical en el golfo de Paria. En este contexto, un desplazamiento de 125 cm en sentido horizontal se distribuiría entre las varias estructuras distensivas. De manera razonable, se puede suponer que aproximadamente un tercio de dicho movimiento (40 cm) sería acomodado por la estructura de interés en el presente trabajo.

De la cantidad de desplazamiento horizontal en la estructura mayor, se puede suponer que la mitad se distribuye de manera uniforme entre las estructuras de su terminación norte, produciendo movimientos horizontales cercanos a los 7 cm, y verticales en el orden de los 13 cm.



CONCLUSIONES

El estudio de eventuales deformaciones cosísmicas en los alrededores de la población de Güiria ha permitido la definición de las estructuras mayores presentes, así como el levantamiento de un inventario de deformaciones frágiles en los distintos afloramientos y acantilados de la zona. De este modo, se definió la existencia de cuatro estructuras mayores de deformación frágil con base en criterios geomorfológicos. Dichas fallas, de carácter distensivo predominante, forman parte de la terminación norte de una estructura NW-SE que se interna en el golfo de Paria y que tiene conexión con los sistemas de fallas de Los Bajos o del *Central Range* de Trinidad, según el modelo regional que se considere.

El inventario de deformaciones permitió el cálculo de tensores de esfuerzos en dos estaciones microtectónicas al oeste de la población de Güiria. Ambos tensores presentan variaciones locales con respecto al tensor regional predominante en la región nororiental de Venezuela. Dichas variaciones son el producto de la cercanía de las estaciones con las fallas normales, cuya cinemática responde a procesos de ajuste locales, inducidos por la complejidad que presentan los accidentes mayores en la región.

Dichos tensores de esfuerzos, permiten apoyar la interpretación realizada con las fotografías aéreas pues los criterios geomorfológicos observables son más bien escasos en la zona. Gracias a ellos, la existencia de un área en transtensión, inferida a partir de la disposición de las fallas, pudo ser comprobada y de esta manera propuesta como modelo local válido para esta zona.

Para la estimación de los desplazamientos cosísmicos asociados a las estructuras interpretadas se plantearon dos escenarios, tomando como base dos modelos regionales propuestos en la literatura. Ambos resultados difieren de manera significativa en la cantidad de movimiento vertical y horizontal resultante, esto debido a la importancia relativa de las estructuras dentro de cada uno de los modelos. Desplazamientos verticales en el orden de 60 cm son estimados sobre la base de un modelo en el que la estructura mayor NW-SE es la prolongación en tierra del sistema de fallas de Los Bajos y las estructuras N-S y NNE-SSW forman la terminación en cola de caballo. Se puede observar aquí que las estructuras interpretadas son de primer y segundo orden respectivamente.

Por el contrario, desplazamientos verticales cercanos a los 13 cm resultan de la adopción de un modelo en el que la estructura mayor NW-SE forma parte de un sistema distensivo en el relevo El Pilar-*Central Range*, mientras que las estructuras N-S y NNE-SSW son fallas menores antitéticas. En dicho modelo, las fallas aquí interpretadas constituirían estructuras de segundo y tercer orden en la configuración del golfo de Paria.



BIBLIOGRAFÍA

- Aggarwal, Y., 1981, Investigaciones sismológicas en el Occidente de Venezuela: implicaciones para las consideraciones sísmicas en el proyecto Uribante-Caparo. FUNVISIS, reporte inédito para CADAFE, 15 pp.
- Audemard, F., M. Machette, J. Cox, R. Dart & K. Haller, 2000, Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions, USGS, Open-File report 00-018, 78 pp.
- Beltrán, C. & C. Giraldo, 1989, Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela, *Mem. VII Cong. Geol. Venez.* Barquisimeto, Nov. 1989, Soc. Venez. Geol., pp 999-1021.
- Beltrán, C., J. A. Rodríguez & A. Singer, 1994, Geología de fallas activas *en* Singer, A. (Coordinador), 1994, Proyecto INTEVEP 92-175. Estudio neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela, inédito, 250 pp.
- Etchecopar, A., G. Vasseur & M. Daignieres, 1981, An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation análisis, *J. Structural Geology*, v. 3, nº1.
- INTEVEP - CEE, 1993, Seismotectonics of northern Venezuela, informe inédito, 48 pp. + Anexos.
- Perez, O. & Y. Aggarwal, Present-day tectonics of the southeastern Caribbean and northeastern Venezuela, *J. Geophys. Res.*, v. 86, nº B11.
- Russo, R.M., R.C. Speed, E.A. Okal, J.B. Shepherd, and K.C. Rowley, Seismicity and tectonics of the Southeastern Caribbean, *J. Geophys. Res.*, v. 98, nº B8.
- Soulas, J. P., A. Mocquet, C. Beltrán, C. Giraldo, 1984, Geología de fallas activas *en* Estudio de riesgo sísmico, enlace vial Margarita-Coche-Tierra firme. FUNVISIS, Caracas, 66 pp.
- Utsu, T. & A. Seki, 1954, A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock (en Japonés), *J. Seism. Soc. Japan*, 7, pp. 233-240.