

Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas

Paleoseismic studies by trenching in Venezuela: methods, objectives applications, limitations and perspectives

Franck A. Audemard M.*

Recibido: octubre, 2001 / Aceptado: mayo, 2002

Resumen

Las 45 trincheras estudiadas en los últimos 32 años atestiguan la larga tradición de los estudios paleosismológicos en Venezuela, aunque seamos considerados en términos de economía mundial como país “en fase de desarrollo”. Las dos primeras trincheras estudiadas en territorio venezolano con tales fines fueron realizadas por la empresa norteamericana Woodward-Clyde & Associates a través de la falla de Oca, en la región de Sinamaica en 1968, en el marco de un proyecto de amenaza sísmica para los diques costaneros de la COLM. Desde 1980, todos los estudios paleosísmicos han sido llevados a cabo por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS–, siendo el estudio de amenaza sísmica para el proyecto hidroeléctrico Uribante-Caparo (estado Táchira), el primero de una serie ininterrumpida de evaluaciones.

A la luz de la experiencia venezolana acumulada, se discutirán en este artículo los numerosos aspectos geográficos y geológicos que deben converger en el sitio para asegurar el éxito de las excavaciones paleosísmicas.

La contribución científica primordial de esta disciplina se orienta hacia un mejor conocimiento de: la actividad holocena de las fallas, el desplazamiento cosísmico, la velocidad o rata de desplazamiento promediado, la segmentación de fallas, la magnitud y recurrencia de sismos históricos y prehistóricos, la asociación sismotectónica de los sismos históricos y la evolución morfológica del paisaje a corto y largo plazo a consecuencia de la tectónica.

En el caso particular venezolano, progresos quedan por hacer en todos los campos antes indicados, debido al alto grado de distribución de la deformación activa dentro del cinturón montañoso y sismotectónico de más de 100 km de ancho, que nos surca desde el estado Táchira hasta el Golfo de Paría, aunque la disciplina se maneja de manera muy apropiada, con obtención de resultados de reconocimiento internacional.

Palabras clave: paleosismología; trincheras; amenaza sísmica; licuación; potencial sismogénico.

* Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Departamento de Ciencias de la Tierra, Caracas-Venezuela. E-mail: faudem@funvisis.internet.ve

Abstract

Paleoseismic studies by trenching in Venezuela: methods, objectives, applications, limitations and perspectives. Despite of Venezuela being a “so-called” developing country, a long paleoseismic tradition is attested by 45 trench assessments in the last 32 years. The first 2 trenches were dug across the Oca fault at Sinamaica in 1968 by the American Woodward-Clyde company. Since 1980, all further paleoseismic studies have been performed by FUNVISIS and the Uribante-Caparo hydroelectric project (southern Mérida Andes) became their first assessment where 22 huge trenches were bulldozer-dug. Except for these CADAFE-financed trenches and two others, all other assessments were for PDVSA. In this paper, geographic and geologic factors conditioning success in paleoseismic studies by trenching shall be discussed based on the Venezuelan experience developed over the years.

The scientific contribution of this approach refer to: Holocene fault activity, slip-per-event and average slip rate of a given fault (or segment), seismic potential (repeat of maximum credible earthquakes) of known faults, fault segmentation, fault interaction as consequence of stress loading by stick-slip on contiguous faults, time-space distribution of seismic activity along a given tectonic feature, seismogenic association of historical earthquakes and landscape evolution on the short and long term. The future of this discipline in Venezuela heads to more trenching in order to gather more data on the previously-mentioned aspects.

Key words: paleoseismology; trenching; seismic hazard; liquefaction; seismogenic potential.

Introducción

Los estudios paleosísmicos a nivel mundial han probado ser de gran utilidad para la estimación del potencial sismogénico (determinación de los sismos máximos probables sobre una falla dada y su correspondiente período de retorno) de los accidentes tectónicos de actividad sísmica moderada, tanto en magnitud como en frecuencia, puesto que permite expandir el período de observación más allá de la sismicidad instrumental y la sismología histórica (para más detalles, referirse a Audemard, 1998), adentrándose en tiempos geológicos recientes (varios miles a decenas de miles de años); y así permitiendo la reconstrucción de la historia sísmica (varios ciclos sísmicos

consecutivos) de dicha falla. La paleosismología cuenta con una serie de posibles enfoques –directos e indirectos (para más detalles, referirse a McCalpin, 1996 y Pantosti, 1997)–, dependiendo del contexto tectónico, geológico-geomorfológico y climático. Particularmente en Venezuela, se ha desarrollado principalmente el enfoque directo que consiste en excavar trincheras a través de las trazas activas con miras a observar y caracterizar las deformaciones permanentes asociadas a la ruptura cosísmica ocurrida sobre la propia falla activa; siendo ocasionalmente tan eficiente que la actividad de algunas fallas a nivel mundial sólo ha sido detectada por este medio, tal como: (a) la falla de Nîmes en

Courthezon, en la región del curso inferior del Ródano –Francia–, cuya última paleo-ruptura cosísmica ocurrió en los últimos 250.000 años (Grellet *et al.*, 1993); y (b) La Moyenne Durance en el sureste francés, cuyo último evento ocurrió entre 27.000 y 9.000 A.P. (Ghafari *et al.*, 1993). Esta disciplina –basada en técnicas de investigación de geología y arqueología clásica– igualmente tiene el atributo de poder precisar en aquellas regiones tectónicamente complejas –tal como Venezuela donde existe un cinturón de deformación activo muy ancho y densamente fallado y plegado– la asociación sismo-falla (sismotectónica) de manera incuestionable (a título ilustrativo, referirse a Audemard, 1997 y 1998). Algunos métodos indirectos paleosísmicos no han sido desarrollados en nuestro país, tal como: (1)- la dendrocronología por no ser aplicable a regiones tropicales, (2)- la evolución/degradación de geofor-mas –por ejemplo, en escarpes de falla– por su especificidad al sitio geográfico y a sus condiciones climáticas, las cuales son altamente variables en nuestras latitudes, tanto en tiempo como en espacio; y (3)- la nivelación topográfica (geodesia de alta resolución en tiempos más recientes) por no contar con campañas previas que sirvan de nivel de referencia. Esto ha llevado a que los esfuerzos nacionales se hayan focalizado en el enfoque directo –excavación de trincheras-. Debemos señalar que diferimos conceptualmente con algunos colegas internacionales en cuanto al diseño de las excavaciones sobre fallas transcurrentes

(por ejemplo: McCalpin, 1996; Pantosti, 1997; quienes requieren/recomiendan hacer trincheras tipo panel), lo cual denota que no atribuyen suficiente importancia o relevancia a los aspectos microtectónicos del plano de falla (cinemática de la falla determinada por la estriación), que relaciona cualquier deformación vertical en las paredes de la trinchera con el movimiento real –cosísmico o acumulativo– a lo largo de la falla.

Además de determinar la capacidad generadora de terremotos de una falla en particular, la evaluación paleosísmica por trinchera suministra información referente a otros aspectos propios del comportamiento sismogénico de la misma: el desplazamiento cosísmico por evento, la tasa de desplazamiento promediada de la falla, la longitud de ruptura cosísmica, el tiempo transcurrido entre eventos, el tiempo transcurrido desde el último evento y la probabilidad de ocurrencia del próximo. Este conjunto de datos geológicos es útil para el desarrollo de modelos de segmentación de falla y de recurrencia sísmica que constituyen los fundamentos modernos del análisis probabilístico de la amenaza sísmica.

No obstante sus numerosas contribuciones, los estudios paleosísmicos por vía de trincheras presentan una fuerte limitación en su aplicación: se requiere que la falla a evaluar presente expresión superficial (traza o ruptura de falla) accesible, lo cual es una gran limitante en tres casos particulares: (1) en aquellas regiones del globo esencialmente carac-

terizadas por márgenes de subducción (contacto interplaca submarino) o por fallas ubicadas en los fondos marinos, pero se ha contorneado el problema ante tales circunstancias estudiando fenómenos asociados al sismo que igualmente dejan rastros en el registro geológico (**a**- cambios de elevación o de la geometría de la superficie terrestre: terrazas marinas elevadas (por ejemplo: Audemard et al., 1997) o deprimidas cosísmicamente, crecimiento vertical de estructuras plegadas; **b**- modificación del patrón de drenaje y de su comportamiento a lo largo de los cauces (por ejemplo: Audemard, 1999a); **c**- cambios en los procesos erosivos/sedimentarios; y **d**- efectos inducidos por el sismo –licuación de suelos e inestabilidades de masas tanto subáreas como subacuáticas-); (2) cuando las fallas son ciegas (sin expresión superficial) o tienen asociadas zonas triangulares (“*triangular zones*”) o prismas intracutáneos (“*intracutaneous wedges*”), lo cual es muy frecuente en las fallas inversas o corrimientos. En este caso, su ocurrencia y caracterización se determina por intermedio de los efectos inducidos y/o todo tipo de modificación topográfica-geológica-geomórfica, tal como en el caso anterior; y (3) cuando la ruptura cosísmica no alcanza la superficie, generalmente producto de un sismo de baja magnitud. En este último caso, no tendría mucha influencia en las evaluaciones de amenaza sísmica por no corresponder al sismo máximo probable (a excepción de fallas que son de corta extensión y consecuentemente de

peligrosidad moderada), aunque si limitaría todos los otros eventuales aportes.

A continuación, presentaremos una visión retrospectiva de todos los estudios paleosísmicos por excavaciones realizados en el territorio nacional, discutiendo los métodos empleados, las dificultades y limitaciones encontradas, así como los resultados más resaltantes obtenidos, estando estos últimos compendiados en el Cuadro 1.

Retrospectiva en Venezuela

En Venezuela, las evaluaciones paleosísmicas por trinchera se inician a fines de los años 1960 con dos excavaciones en la falla de Oca, en el sector de la laguna de Sinamaica ubicada al norte de Maracaibo, por parte de la empresa americana Woodward-Clyde & Associates en 1968. A pesar de los numerosos problemas técnicos presentados durante su excavación (materiales arenosos sueltos muy inestables y altamente saturados en agua), que determinaron la poca profundidad de penetración de las trincheras de exploración (del orden de 7 pies; Figura 1), se pudo postular la ocurrencia de un sismo en esta falla durante los últimos 2.500-2.700 años (Cluff & Hansen, 1969). Otro de los problemas referidos por los propios autores concernía a la gran homogeneidad (uniformidad) de los tipos litológicos presentes que dificultaron la observación de las deformaciones en las paredes de la excavación; esto atribuible

Cuadro 1. Estudios paleosísmicos realizados en Venezuela entre 1968 y 1999

Location	Year	Tectonic feature assessed	Number of trenches	Main results	Performed by (Ref. N°)
Sinamaita lagoon, Zulia state	1968	Oca fault, westernmost segment in Venezuela	2	Holocene activity confirmed Latest event occurred in the last 2,500 years	[21]
Uribante-Caparo region, Táchira state	1980-81	Uribante, Doradas and Caparo faults	22	Unpublished Late Pleistocene-Holocene activity confirmed at La Honda y Borde Seco dam sites.	[24], [37]
Agua Viva, Trujillo state	1986	Valera fault	1	2,000 year return period for Ms 6.9 maximum credible earthquakes	[25],[37],[38]
Mene Grande, Zulia state	1986	Mene Grande fault	1	Holocene activity confirmed. Thrust faulting confirmed Slip rate: 0.1 mm/a	[25],[37],[38]
La Grita, Táchira state	1986	Boconó fault, southernmost segment	1	Confirmation of two historical earthquakes:1610 and 1894. Slip rate is 5.2±0.9 mm/y. Earthquakes of Ms 7.1-7.3 about every 300 y.	[31],[16],[26], [37]
El Aguacil (Caja Seca-Arapuey), Zulia state	1986	Andes Northern thrus front	2	Unpublished. No fault found	[26]
Cordero, Táchira state	1987	Boconó fault, southernmost segment	1	3 Holocene earthquake revealed fault slip diminishes to the south (longer recurrence)	[31],[16],[26], [18]
Buena Vista, Lara state	1987	Boconó fault, northernmost segment within the Andes	1+ road cut	Holocene activity confirmed	[18]
Páramo La Colorada,	1989	La Colorada-Mcanillo fault; northern	5	Unpublished 4 events as large as Ms 6.2-6.3 in the last 5,000 years (lates one may correspond to 1919 event)	[27]
Boca de Tocuyo and Tocuyo de la Costa	1990	Liquefacción features (sand blows and vents)	19	Pre-existing weak zones used by venting sand Also, vented by cracks generated by lateral spreads in young flat alluvial plains	[10],[29]
Hato La Pica, eastern Zulia state	1990	Ancón fault; segment east of Maracaibo lake	1	Holocene earthquakes as large as Ms 7.4-7.5 every 4,000 years. Slip rate is about 1.45 mm/a	[1],[2],[28]
El Mamón creek, north of Urumaco, Falcón state	1990	Urumaco fault; one strand of the eastern segment	None (natural outcrop)	Two earthquakes of Ms 5.8-6.4 in the last 20,000 years	[8],[9],[28]
Hato El Guayabal, western Falcón state	1991	Oca fault; segment east of Maracaibo lake	1	Latest event in the last 2,500 years	[1],[2],[28]
Las Toscas	1994	El Pilar fault; between Casanay and Casanay river	1	Several earthquakes of Ms >7.0 every 900-1,200 years	[19],[20],[30]
Morro de Los Hoyos, Mérida state	1997	Boconó fault, segment north of Mérida	1	Several (6 to 8) earthquakes of Ms >7.0 every 1,100-1,500 years	[11]
Terranova-Guarapiche, Sucre state	1998	El Pilar fault, segment between Cumaná and Casanay river	3+ antropic cut	Under evaluation	-

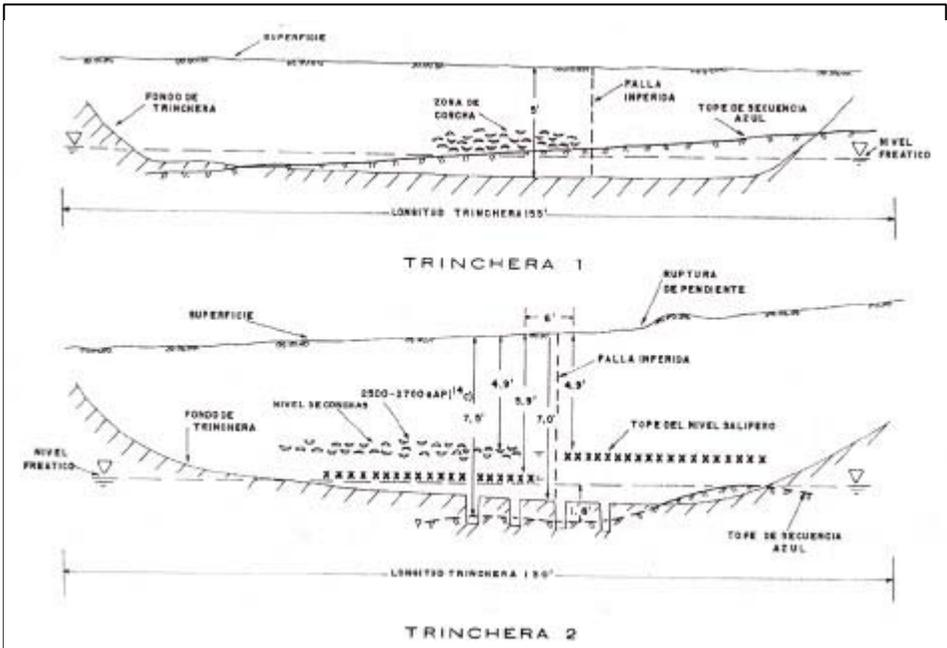


Figura 1. Trincheras de evaluación paleosísmica realizadas por la empresa Woodward-Lungren & Associates en la falla de Oca, en proximidad a la laguna de Sinamaica, al norte de Maracaibo (tomado y traducido de Cluff y Hansen, 1969)

al hecho de haber cortado sólo cordones litorales holocenos, compuestos por materiales granulares de tamaño arena poco cohesivos y sin estructuración interna (ausencia de laminación/estratificación).

Posteriormente a este estudio pionero y luego de varios años de inactividad, Funvisis relanza este tipo de estudios a comienzos de la década de los años 80, convirtiéndose en el único ente que ha aplicado y desarrollado esta disciplina en Venezuela desde entonces y hasta el presente, lo cual le ha permitido detectar por esta vía la ocurrencia en el reciente geológico, de grandes terremotos en diversas fallas (Cuadro 1), en el marco de

contratos de servicios para las industrias petrolera y eléctrica nacional.

En 1980, Funvisis es llamado a realizar los estudios de amenaza sísmica para el Proyecto Hidroeléctrico Uribante-Caparo, al sureste del estado Táchira. Aprovechando los gigantescos movimientos de tierra ejecutados para la deforestación de los vasos y para la construcción de las presas de dicho proyecto, hoy conocido como Desarrollo Hidroeléctrico de Uribante-Caparo –DESURCA–, se acometen trincheras de evaluación paleosísmica dirigidas por primera vez por personal venezolano y asesoradas por cooperantes franceses, entre ellos Jean-Pierre Soulas. En vista de la disponi-

bilidad de la maquinaria pesada, aunado a ninguna restricción presupuestaria, el grupo de Ciencias de la Tierra de Funvisis emprende, ejecuta y estudia 22 trincheras distribuidas sobre las fallas de Caparo, Doradas y Uribante. La evaluación paleosísmica en este proyecto no va a ser sólo monumental por el número de excavaciones ejecutadas, sino por la dimensión de las mismas (Figuras 2 y 3). Algunas de éstas excavadas con retroexcavadora – jumbo– alcanzaron hasta los 15 m de profundidad. No obstante, aunque los resultados paleosísmicos fueron incorporados a los cálculos ingenieriles del proyecto, los mismos nunca han sido publicados por sus autores, pero ha

podido salir a relucir que dichas excavaciones confirmaron la activación durante el Holoceno y el Pleistoceno superior de los accidentes tectónicos presentes en los sitios de presa de La Honda y Borde Seco (Figura 3; Singer, com. per., 2000).

Durante la vigencia de la cooperación de Jean-Pierre Soulas (1980-1987) con Funvisis, en el marco de la Cooperación Técnica Franco-Venezolana, varias trincheras de evaluación paleosísmica fueron excavadas posteriormente sobre varios grandes accidentes tectónicos del occidente venezolano. Aunque el proceso inflacionario y devaluatorio ya se había abatido sobre la economía venezolana, los recursos financieros suministrados por la

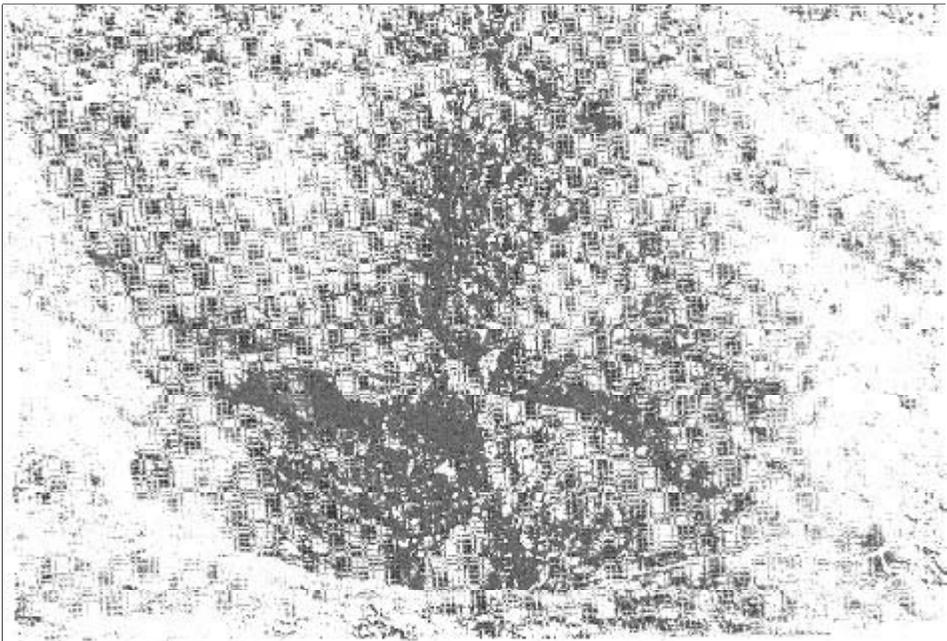


Figura 2. Excavación LH-8 con jumbo en la falla La Honda, en el área del Proyecto Hidroeléctrico Uribante-Caparo (vista tomada por A. Singer). El individuo limpiando la pared de la excavación a mano atestigua la monumentalidad de tales trincheras



Figura 3. Detalle de la trinchera anterior, donde se muestra depósitos lacustres cuaternarios deformados por un sistema de fallas normales, cuyos saltos verticales están siendo medidos por Soulas (vista tomada por A. Singer)

Industria Petrolera Venezolana, representada por varias de sus filiales, permitió proseguir con la excavación de trincheras ejecutadas por bulldozers (D-6 a D-8) y/o jumbos. Estas trincheras descomunales se caracterizaban por remociones de material del orden de más de 2.000 m^3 y ocasionalmente hasta los 5.000 m^3 , con dimensiones de: hasta unos 80 m de largo, 8 m de profundidad y ancho variable entre 8 a 4 m de tope a base respectivamente, con sección transversa trapezoidal para asegurar la estabilidad de las paredes. La utilización de este tipo de maquinaria introducía dos limitaciones logísticas: (a) buena vialidad local (como mínimo engrazonada –tipo

macadam-) para permitir la accesibilidad de la maquinaria al sitio seleccionado, la cual generalmente era desplazada por “low-boys”; (b) las dimensiones del sitio a excavar debían permitir, por una parte, la maniobrabilidad de la maquinaria pesada, y por otra, la acumulación de los escombros removidos. Las paredes de estas excavaciones fueron todas lavadas con agua a presión, usando motobombas. Igualmente, cuando fue requerido, se achicaron con motobombas, para lo cual el diseño de la excavación incluía una fosa de recolección. En 1986 y 1987, se abrieron en orden secuencial las trincheras de: (1)- Agua Viva (al norte del embalse de igual nombre, estado Trujillo) sobre el

segmento norte de orientación submeridiana de la falla de Valera (Funvisis, 1987a; Soulas, 1988; Soulas y Giraldo, 1994), (2)- Mene Grande (estado Zulia) sobre la falla de Mene Grande (Funvisis, 1987a; Soulas, 1988; Soulas y Giraldo, 1994), (3)- La Grita (Hotel La Montaña, estado Táchira) sobre la falla de Boconó (Funvisis, 1987b; Audemard y Soulas, 1995; Audemard, 1997), (4)- dos trincheras en Arapüey-Alguacil sobre el sistema frontal norandino, igualmente en Octubre de 1986 (Funvisis, 1987b), (5)- Cordero (Fundo Mis Delirios, estado Táchira) también sobre la falla de Boconó pero en su segmento andino más meridional (Funvisis, 1987b; Audemard y Soulas, 1995; Audemard, 1997); y (6)- Buena Vista (San Miguel, estado Lara) sobre la falla de Boconó en marzo de 1987 (Beltrán *et al.*, 1990). Las dos trincheras de Alguacil corresponden a las únicas

fallidas en su acometido paleosísmico, debido a que el escarpe de flexura excavado está asociado a una estructura triangular (en consecuencia, a una falla inversa ciega en posición profunda en el subsuelo), cuya identificación y comprensión fue sólo posible a inicios de la década siguiente, cuando líneas sísmicas petroleras de mejor resolución permitieron establecer el comportamiento mecánico de dicho frente inverso (Audemard, 1991; De Toni y Kellogg, 1993; Duerto *et al.*, 1998).

De la trinchera de Agua Viva, Soulas y colaboradores (Funvisis, 1987a) –cuyos resultados fueron posteriormente publicados por Soulas y Giraldo (1994)– concluyen que la falla de Valera es de movimiento horizontal predominante con base en el estilo de deformación presente en las paredes de dicha trinchera (Figura 4), lo cual corroboró el desplaza-

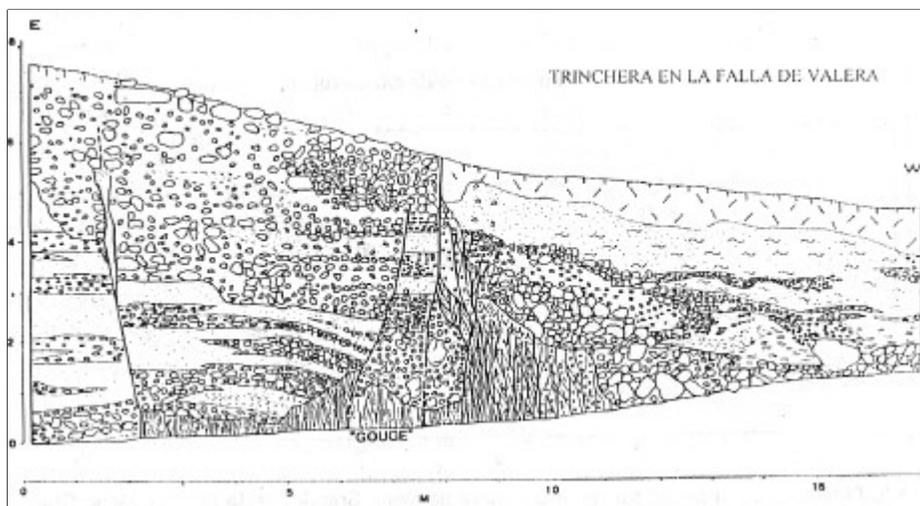


Figura 4. Diagrama de la pared sur de la trinchera de Agua Viva, en la falla de Valera, donde se aprecia el estilo característico de falla transcurrente (tomado de Soulas y Giraldo, 1994)

miento sinistral deducido de las evidencias geomórficas de fallamiento activo previamente cartografiadas. Igualmente, establecen que: (a)- la falla ha producido sismos en 8085 ± 565 , 6207 ± 742 y 4505 ± 1560 años BP; es decir con recurrencia del orden de unos 2.000 años; (b)- el último evento ocurrido debe ser histórico puesto que el horizonte más reciente fallado es considerado actual según las fechaciones radiocarbónicas; este último sismo podría corresponder al evento del 30 de enero de 1929; (c)- la velocidad de movimiento horizontal sinistral a lo largo de este segmento submeridiano de la falla de Valera es del orden de 1 mm/a; y (d)- la falla de Valera pudiese generar sismos máximos probables Ms 6,9 cada 2.000 años aproximadamente. Sin embargo, estos autores discuten que es muy probable que el registro geológico –por ende igual-

mente el sísmico- esté incompleto en la localidad excavada, lo cual justificaría el intervalo de tiempo tan prolongado entre los dos eventos más recientes (dos veces tan largo como el período de retorno estimado). Por otra parte, plantean que pudiese darse el caso que la recurrencia de hecho sea variable, aunque se inclinan por la primera alternativa discutida.

Por su parte, la trinchera de Mene Grande revela el carácter inverso con vergencia al este de la falla de igual nombre a lo largo de este sector (Figura 5). Soulas y Giraldo (1994) estiman con base en terrazas aluviales cuaternarias su velocidad en el orden de 0,1 mm/a. Igualmente, determinan la peligrosidad sísmica de la falla: sismos máximos probables de magnitud Ms 6,2 y retorno del orden de 1.200 años.

A continuación e igualmente bajo la coordinación de Soulas, se excava la

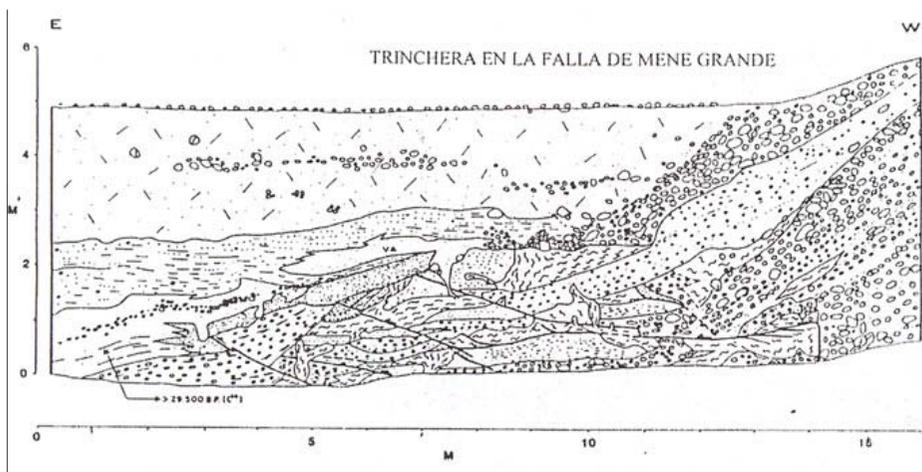


Figura 5. Diagrama de la pared sur de la trinchera de Mene Grande, en la falla de Mene Grande, donde se aprecia el estilo característico de falla inversa con vergencia hacia el este (tomado de Soulas y Giraldo, 1994)

primera trinchera sobre la falla de Boconó en proximidad al Hotel La Montaña bajo la dirección de Giraldo y Audemard en Octubre 1986. Esta trinchera presentó un sin número de complicaciones técnicas durante su excavación, entre las que merecen mención: (a)- mesa de agua relativamente superficial por excavar una laguna de falla activa; adicionalmente, el nivel freático se encontraba alto por realizarse el estudio al final del período lluvioso (noviembre); (b)- la ocurrencia de lluvias menudas pero de larga duración (superior a doce horas) inundaron la excavación, lo cual en ocasiones requirió de más de un día continuo de bombeo; (c)- el cambio contraproducente de condiciones climáticas condujo a cambiar de maquinaria: D6 de oruga a D6 de tejas, por la ineficiencia del primero en trabajar en condiciones pantanosas; (d)- el empeoramiento de las condiciones climáticas condujo a traer adicionalmente un jumbo para poder concluir la excavación por la imposibilidad del tractor pantanero (D6 de tejas) de remover el material desde el fondo de la trinchera; (e)- la presencia de grandes bloques de origen coluvial provenientes de la ladera contigua al sagpond requirió del concurso de un jumbo para su extracción y desalojo; (f)- la presencia de niveles arenosos no compactados en combinación con altos niveles de sobresaturación del suelo indujeron el colapso de las paredes de la trinchera; proceso que ocurrió luego de haber concluido el lavado de ambas paredes y requirió de la remoción del

material colapsado por parte del jumbo; y (g) la necesidad de usar el jumbo desde el costado de la trinchera por estar la forma y profundidad de la excavación muy adelantadas, desestabilizó aún más las paredes a estudiar. Todos estos factores –que ocurrieron aún cuando se había previsto y excavado desde el inicio una fosa individual o calicata secundaria de unos 4,5 m de profundidad para abatir el nivel freático- conllevaron a retrogradar de una excavación que había superado los 5,5 m de profundidad a algo más de unos 3 m. No obstante la limitada exposición ofrecida por las paredes de la misma, deformaciones muy nítidas fueron reveladas dentro de una secuencia de sedimentos con excelente desarrollo de la estratificación; la cual pudo ser igualmente muy bien datada en vista de la cantidad de madera preservada por las arcillas anóxicas de la laguna de falla, bajo la forma de troncos de árboles y juncos en posición de vida (Figura 6). Los resultados científicos de esta investigación paleosísmica han sido ampliamente discutidos y difundidos (referirse a Audemard y Soulas 1995; Audemard 1997; Audemard, 1998), aunque merece mención la corroboración de la asociación sismotectónica de dos grandes terremotos andinos (el sismo de Mocotíes de 1610 y el Gran Terremoto de los Andes Venezolanos de 1894) con este segmento de la falla de Boconó.

Simultáneamente al estudio realizado en La Grita sobre la falla de Boconó, dos trincheras eran excavadas por Soulas y Giraldo a fines del año 1986 (Funvisis,

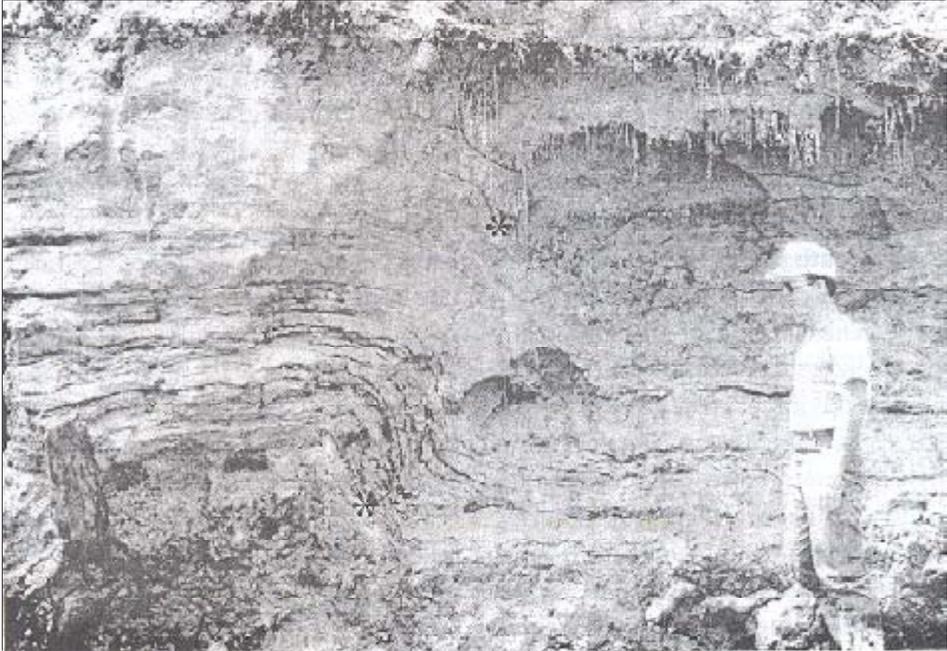


Figura 6. Detalle de la pared este de la trinchera de La Grita, en la falla de Boconó, donde se aprecia deformación por plegamiento en sedimentos arcillosos lagunares saturados sobre deformación frágil en coluvión infrayacente (pliegue por propagación de falla normal o "fault-propagation fold"); así como base de troncos de árboles "fosilizados" en posición de vida (vista tomada por J-P. Soulas)

1987a) en los escarpes de flexura del sistema frontal inverso norandino en el sector de Arapuey-Alguacil (Figura 7). Los resultados arrojados fueron previamente indicados.

Las complicaciones o dificultades técnicas presentes durante la excavación de la trinchera del Fundo Mis Delirios, en proximidad a Cordero, en el período seco siguiente (Febrero 1987), fueron bien anticipadas como consecuencia de una buena comprensión de las condiciones topográficas y de los ambientes sedimentarios cuaternarios actuantes. La realización de un canal de desagüe alrededor de la excavación permitió

abatir la mesa de agua que alimentaba la laguna de falla a ser estudiada y asegurar una trinchera esencialmente seca (Figura 8); esto aunado a haber decidido esperar el período seco para ejecutar la excavación. No obstante, la selección apropiada de la maquinaria (D8 de oruga y jumbo) permitió vencer los escollos que representaba el desnivel topográfico de 18 m existente entre el lomo de obturación y el sag-pond contiguo (Figura 8), así como los grandes bloques de roca que se esperaban encontrar dentro de los depósitos aluviales que conformaban el lomo de obturación. La remoción y reubicación de los escombros en esta trinchera

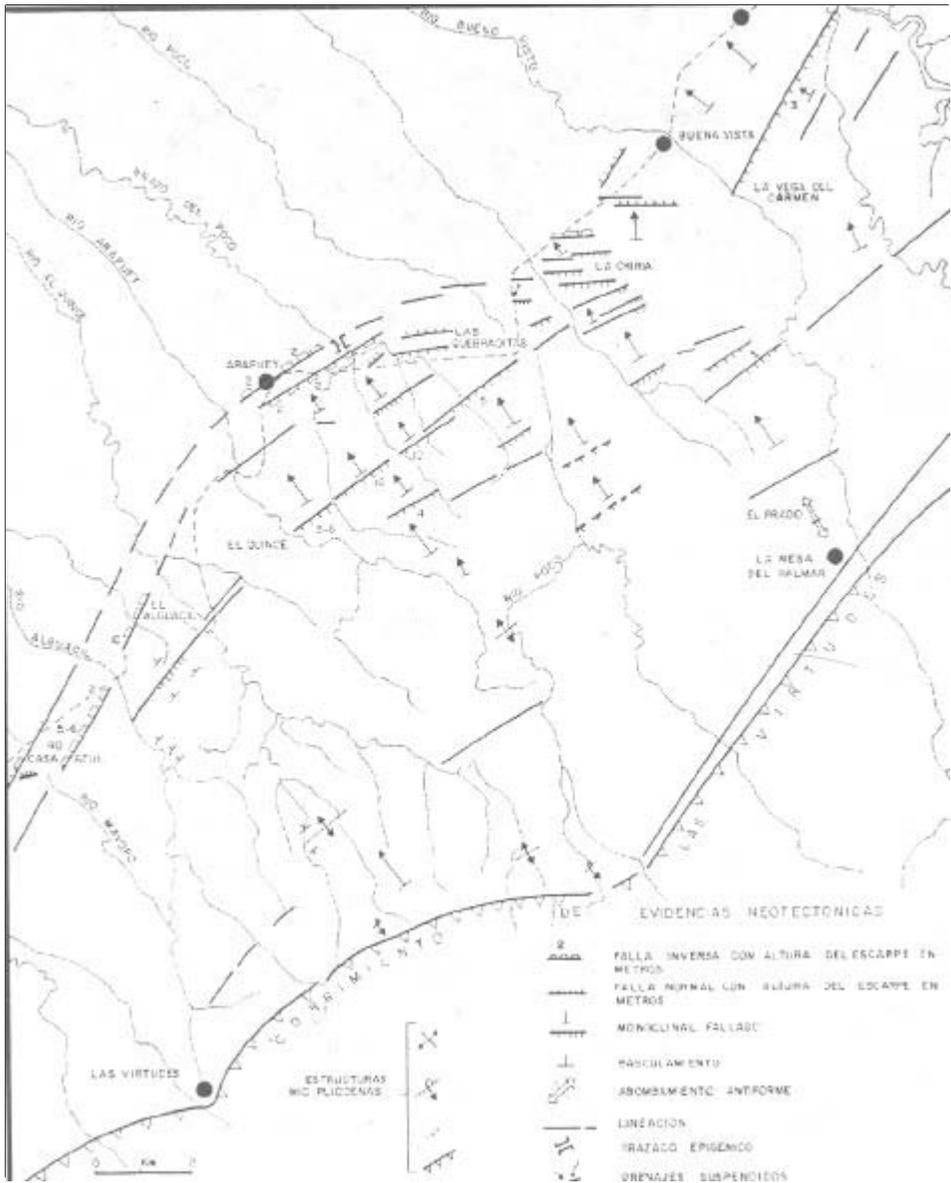


Figura 7. Fotointerpretación de los rasgos geomórficos diagnósticos de fallamiento activo a lo largo del flanco norandino, entre El Alguacil y Buena Vista, realizada y gentilmente cedida por A. Singer. Es significativo el elevado número de escarpes en fallas normales de exposición contraria al flanco norandino, aunque no fue comprendido en su debido momento por carencia de información de subsuelo de óptima calidad

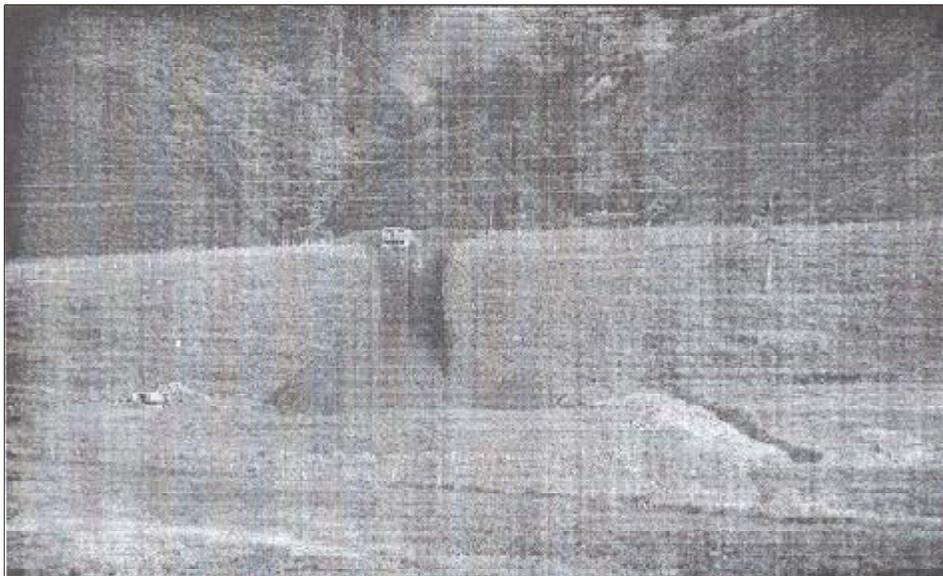


Figura 8. Vista general del sitio de excavación en el Fundo Mis Delirios, en proximidad a Cordero, edo. Táchira-, en el sector más meridional de la falla de Boconó. Obsérvese tanto el desnivel topográfico entre el lomo de obturación compuesto por depósitos aluviales del río Torbes y la laguna de falla a su pie como la construcción de un canal de desagüe alrededor de la parte baja de la trinchera cortada a expensas de la laguna de falla

con tal desnivel topográfico tuvieron que ser cuidadosamente planeados para poder asegurar el relleno de la excavación concluido el estudio paleosísmico, siguiendo solicitud expresa de los propietarios del Fundo Mis Delirios dedicado a la ganadería lechera. Los resultados paleosísmicos obtenidos en esta localidad han sido ampliamente discutidos por Audemard (1997). Todas estas excavaciones realizadas entre 1986 y 87 fueron financiadas por filiales de la Industria Petrolera Nacional –Intevep, S.A. y Maraven, S.A.

En marzo siguiente, otro equipo del Dpto. de Ciencias de la Tierra (Giraldo, Beltrán y Singer) emprende una nueva

evaluación paleosísmica sobre la falla de Boconó, pero en su sector andino más septentrional (Cubiro-Barquisimeto) a solicitud de la Alcaldía de Iribarren con fines de microzonificación sísmica de la ciudad de Barquisimeto; proyecto aún sin concluir por carencia de recursos financieros del ente contratante. La dificultad técnica más resaltante de este estudio resultó ser el relleno de la trinchera luego de concluido el estudio por su posición tan próxima a un acantilado de la margen derecha del río Turbio, lo cual imposibilitaba la libre maniobrabilidad del tractor utilizado (Figura 9). Por otra parte, el bajo contenido de materia orgánica y de depósitos



Figura 9. Vista general longitudinal a la excavación de Buena Vista (o San Miguel, edo. Lara) en el sector andino más septentrional de la falla de Boconó. Obsérvese el borde libre en la extremidad opuesta, así como la acumulación de los escombros a ambos lados

recientes en el sitio seleccionado constituyeron una fuerte limitación en la interpretación de la actividad sísmica de la falla de Boconó en este sector, aunque confirmó su activación holocena. Es altamente probable que ello resulte de no haber cortado la traza principal de la falla sino una grieta R-T presente bajo la forma de un surco abierto y colmatado. La publicación de dichos resultados aún está pendiente por razones obvias.

En 1989, en el marco del proyecto Sumandes II (Maraven-Funvisis), Singer y Beltrán excavan manualmente 5 trincheras de dimensiones pequeñas en la falla de La Colorada, en el Páramo de igual nombre y a unos 3.200 m de altitud (Figuras 10 y 11). La necesidad de ejecutar las trincheras a pico y pala resulta de la

inaccesibilidad del sector para maquinarias pesadas. Los sitios seleccionados correspondían a lomos de obturación que represaban pequeñas lagunas de falla. Esta falla, según el estudio paleosísmico realizado, produjo 4 eventos de magnitud moderada (M_s 6,2-6,3) en los últimos 5.000 años, pudiendo el más reciente corresponder al sismo de 1919 (Funvisis, 1991a).

A consecuencia de dos eventos de magnitud moderada, el proceso de licuación de suelos ocurrió en forma masiva en las llanuras deltáico-costeras de Falcón oriental en abril-mayo de 1989. Por el interés de Intevep, S.A. en conocer las características de este proceso asociado a fenómenos de inestabilidad de masas en zonas de muy baja pendiente (“lateral

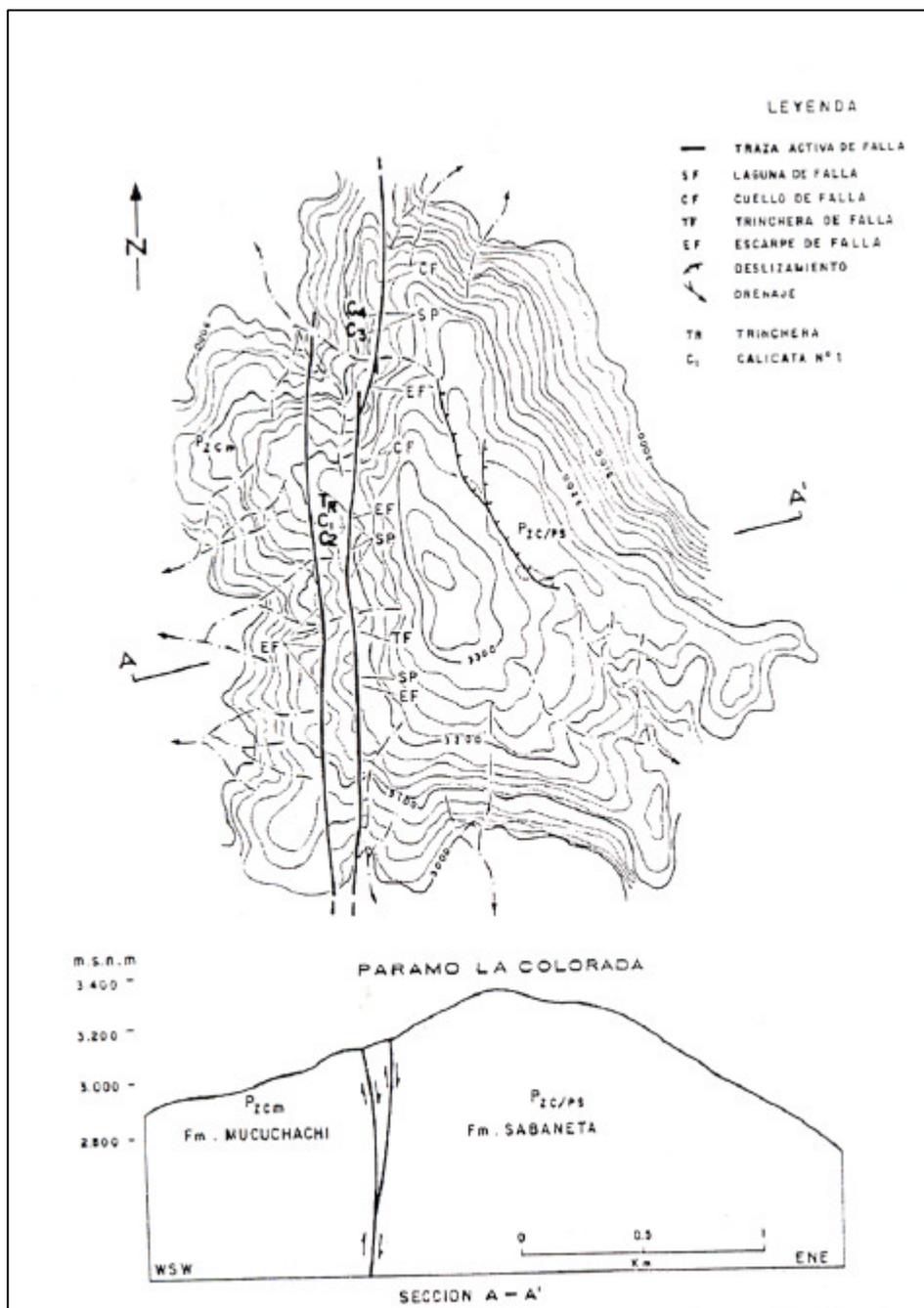


Figura 10. Ubicación relativa de las calicatas excavadas a mano en el Páramo de La Colorada, para exponer la falla de igual nombre (tomado de Funvisis, 1991a)

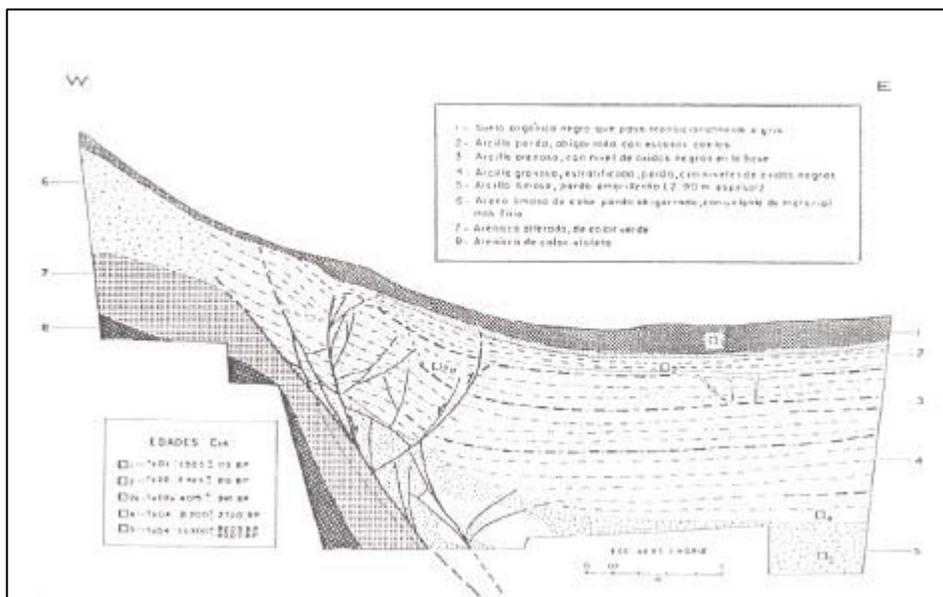


Figura 11. Diagrama de la pared norte de una de las calicatas excavadas en el Páramo de La Colorada (tomado de Funvisis, 1991a)

spread”; Figura 12) con miras a evaluar eventuales escenarios sísmicos similares que afectasen la seguridad e integridad física de los diques costaneros de la C.O.L.M., se aplican técnicas paleosísmicas a través de los remanentes superficiales pobremente preservados de licuación (volcanes de arena y grietas de ventilación suavizados por las lluvias) aún identificables en la población de Boca de Tocuyo y Tocuyo de la Costa a fines de 1989 e inicios de 1990. Son excavadas 19 calicatas de aproximadamente 1 m² en planta y 0,75 m de profundidad, estando esta última condicionada por el nivel freático. Los resultados de este estudio fueron extensamente discutidos y publicados por Audemard y De Santis (1991). Coincidentalmente, esta técnica de

investigación paleosísmica en rasgos de licuación producidos durante sismos contemporáneos en territorio venezolano es aplicada por primera vez a nivel mundial y simultáneamente con colegas norteamericanos que lo ensayaron en la licuación asociada al sismo de Saguenay –Canada– de noviembre de 1988 (Tuttle *et al.*, 1990).

En el período seco, entre fines del año 1990 e inicios de 1991, dos trincheras son excavadas sobre las trazas individuales de las fallas de Ancón (Hato La Pica, estado Zulia) y Oca (Hato El Guayabal, estado Falcón), en las llanuras de Buchivacoa, al este de la bahía de El Tablazo, en el marco del Proyecto **SU** ministro **FALcón-Zulia-SUFZ**, contratado entre Maraven, S.A. y Funvisis y coordinado por Audemard en

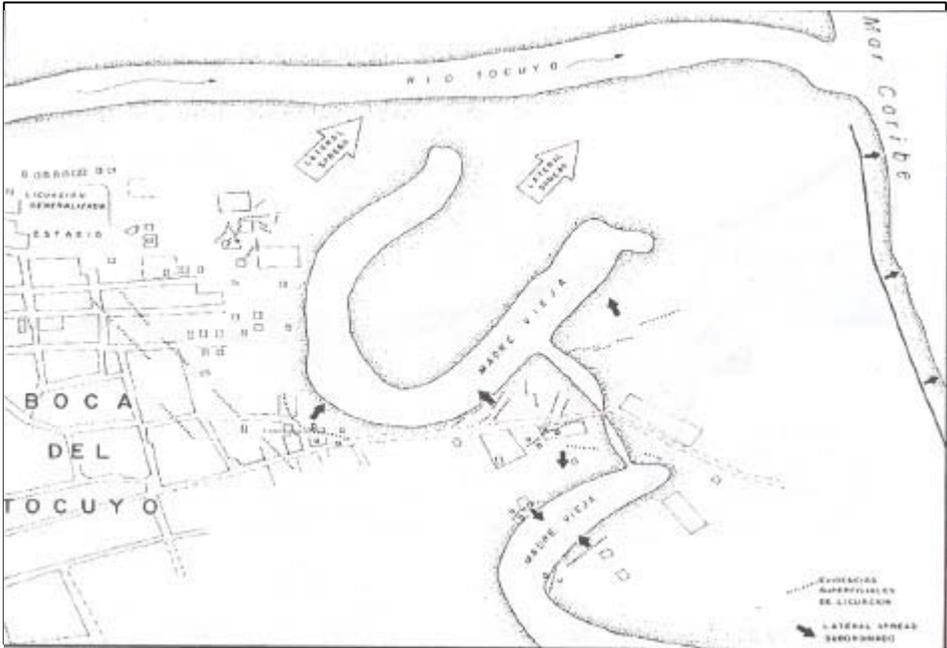


Figura 12. Evidencias superficiales de procesos de licuación de suelos en la población costanera de Boca de Tocuyo -Falcón oriental- inducidos por dos sismos moderados en abril-mayo 1989 y asociados a movimientos del tipo "lateral spread"

compañía de Rodríguez, Chacín, Adrianza y un cooperante español en entrenamiento, Antonio Casas-Sainz. En este mismo proyecto, igualmente se evalúa la falla de Urumaco desde el punto de vista paleosísmico, usando un afloramiento natural excavado por un afluente del río Urumaco. Los resultados de estas evaluaciones han sido ampliamente discutidos y publicados (Funvisis, 1991b; Audemard, 1993; Audemard *et al.*, 1995; Audemard, 1996; Audemard *et al.*, 1999a), aunque algunos detalles relevantes son suministrados en el Cuadro 1. No obstante, dicha evaluación arrojó que el sistema de fallas de Oca-Ancón—*aunque considerado por muchos geólogos como*

tectónicamente inactivo— ha generado sismos de magnitud cercana a Ms 7,5 durante el Holoceno y con períodos de retorno que oscilan entre los 2.000 a 4.500 años para el segmento estudiado del sistema (Audemard, 1993; Audemard & Singer, 1994; Audemard, 1996; Audemard & Singer, 1996). Es probable que tal aseveración sobre su grado de actividad se haya basado en la bajísima sismicidad instrumental contemporánea registrada en dicho sector—aparenta ser un gap sísmico—. Destaquemos que la información sísmica existente (instrumental, histórica y pre-histórica) conlleva a pensar que la quiescencia de dicho sistema de falla puede ser indicador de la

cercanía de un próximo gran terremoto en este sector o segmento del sistema de fallas de Oca-Ancón, con epicentro al este de Maracaibo, tal como fue sugerido por Audemard (1996). Desde el punto de vista técnico-logístico, las excavaciones de los Hatos El Guayabal y La Pica no presentaron mayores complicaciones ya que se comportaron muy estables y no hubo presencia de agua. No obstante, la trinchera de El Guayabal presentó: (a)- ciertas dificultades de accesibilidad (Figura 13), (b)- requirió de la deforestación de una parcela próxima a la media hectárea de superficie para permitir la maniobrabilidad de la maquinaria (tractor y mototrailla; Figura 14) y la acumulación de escombros, lo cual requirió de una permisología engorrosa ante las autoridades competentes, (c)- conflictos de intereses entre terrateniente y comuneros que conllevó a que la

excavación fuera parcialmente tapada (en propiedad privada) y dejada abierta (en camino vecinal de Masuid), en una región donde esencialmente escasea el agua (Figura 14), y (d)- gran proporción de arcillas expansivas que imposibilitó el apropiado lavado de las paredes de la trinchera, así como dificultó la observación de la deformación frágil por la introducción de numerosos planos estriados adicionales (no tectónicos). Por su parte, la trinchera de Hato La Pica, la cual fue transformada en “jagüey” a solicitud del propietario (Figura 15), fue excavada de manera programada para convertirse posteriormente en reservorio de agua. La reubicación de los escombros se hizo bajo la forma de terraplenes construidos directamente por una mototrailla y dispuestos como un gigantesco embudo abierto aguas arriba para acelerar la recolección de las aguas de

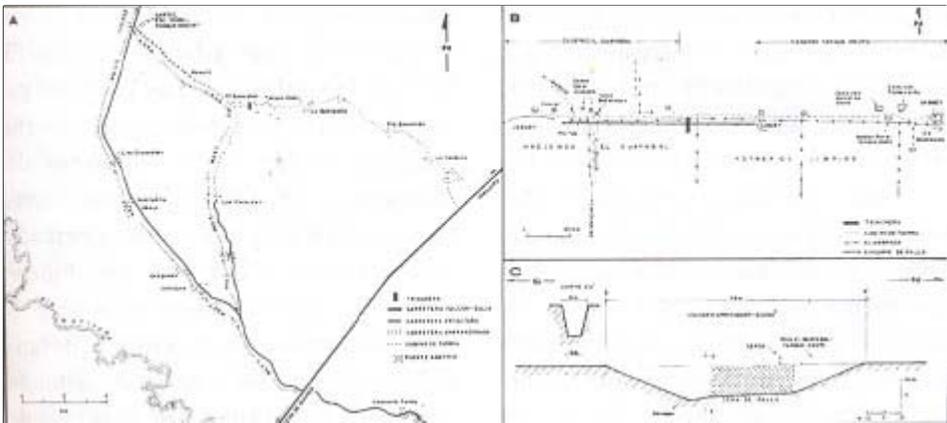


Figura 13. Sitio de trinchera en la falla de Oca, al este del lago de Maracaibo, en el Hato El Guayabal -entre Masuid y Tanque Onoto, Falcón occidental-: (A)- ubicación relativa, accesibilidad y calidad relativa de la vialidad local; (B)- localización del sitio de trinchera en el Hato el Guayabal, con respecto al accidente a evaluar; y (C)- geometría prevista de la trinchera previa excavación, donde se especifican las dimensiones de la misma y la ubicación relativa de la fosa de bombeo



Figura 14. Vista oblicua del sitio de trinchera de Hato El Guayabal en proximidad a Masuid, edo. Falcón. Nótese la condición final de la parcela deforestada, así como la geometría final de la trinchera luego de parcialmente rellenada a causa de litigios entre comuneros. El reservorio de agua en el fondo indica la posición del bloque relativamente deprimido y del escarpe a contrapendiente excavado

escorrentía y lluvia de la llanura aluvial (Figura 15). La única complicación surgida con esta trinchera correspondió a la aparente incongruencia entre el perfecto movimiento horizontal revelado por la estría sobre el plano de falla de Ancón y la presencia de saltos verticales, lo cual fue resuelto por intermedio de una campaña de perforaciones con recolección de núcleos que permitió determinar que la secuencia sedimentaria estaba levemente inclinada, introduciendo desplazamientos verticales aparentes (para más detalles, referirse a Audemard, 1996).

A inicios de 1994, y en el marco de un proyecto financiado por Intevp, S.A., Funvisis –bajo la conducción de Beltrán

y en la compañía de los Ings. Rodríguez y Rivero– excava la primera trinchera en el oriente del país, sobre la falla de El Pilar, en la localidad de Las Toscanas y a pocas decenas de metros al norte del río Casanay, entre las poblaciones de Guarapiche y Río Casanay, estado Sucre. Esta será la última excavación ejecutada con un tractor; y por ende con dimensiones del orden de 80-90 m de largo, 8 m de ancho máximo en el tope y profundidad superior a los 5 m. En la misma se determinó que dicha traza de la falla de El Pilar presenta una recurrencia del orden de 900 a 1.200 años para sismos de magnitud superior a 7 (Funvisis, 1994; Beltrán *et al.*, 1996; Beltrán *et al.*, 1999).

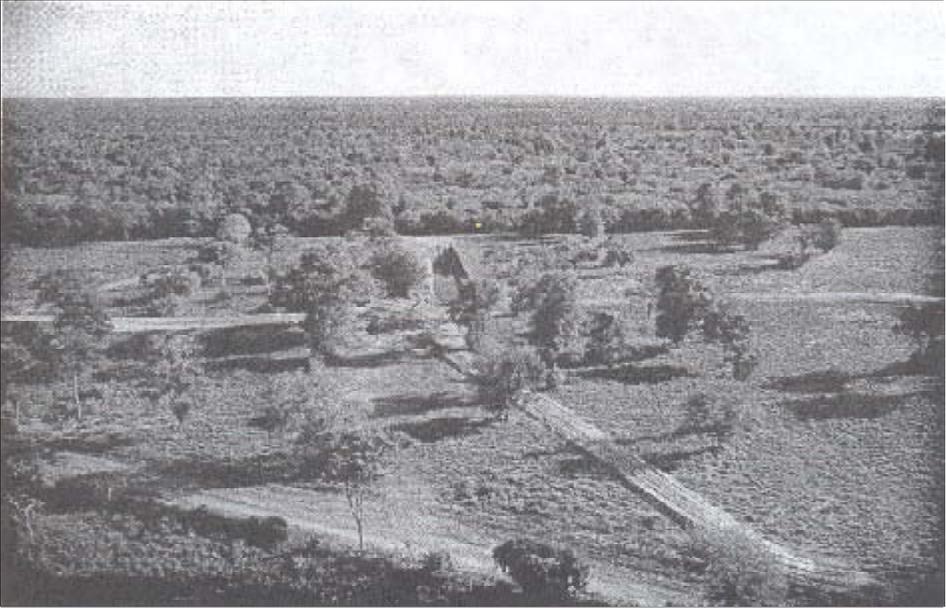


Figura 15. Vista oblicua del sitio de trinchera de Hato La Pica, en la falla de Ancón, región nororiental del edo. Zulia, donde se aprecia la disposición en embudo de camellones de tierra construidos por una mototralla a partir de escombros removidos de la excavación. El espejo de agua en la trinchera refleja el grado de efectividad de los movimientos de tierra realizados a tal fin

La enseñanza, desde el punto de vista logístico, dejada por esta excavación radica en que debemos tratar de evitar excavar en proximidad a un río (con agua corriendo aún en período seco) con cota o elevación similar al sitio de trinchera preseleccionado, ya que tal condición topográfica asegura la presencia de agua dentro de la excavación. Tal situación fue remediada con la excavación de una pequeña zanja longitudinal a lo largo del eje mayor de la trinchera y su bombeado en continuo (Figura 16). La limitación más importante en cuanto a los resultados arrojados es que la falla presenta por lo menos tres trazas activas subparalelas en el sector seleccionado para la

evaluación paleosísmica, lo cual asegura la ocurrencia de deformación distribuida, implicando que sólo se está cuantificando parte de la deformación activa y en consecuencia se requiere ejecutar-evaluar tantas trincheras como trazas activas existan.

A solicitud del proyecto internacional PILOTO y con financiamiento de la Unión Europea, Funvisis –en la persona de Audemard– es comisionada para ejecutar la cuarta trinchera sobre la falla de Boconó, con fines de realizar un taller de entrenamiento en paleosismología para colegas latinoamericanos (*South American Workshop On Paleoseismology –SAWOP–*; para más detalles, referirse a página web:



Figura 16. Vista general de la pared oeste de la trinchera de Las Toscanas, en la falla de El Pilar, entre las poblaciones de Guarapiche y Río Casanay, región central del edo. Sucre. Obsérvese el contraste litológico introducido por la falla. Igualmente, identifique un canal de desagüe/bombeo en posición axial longitudinal

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kojiok/QR/sawop.htm>; también a *Laffaille et al.*, 1998). Luego de una campaña de campo para pre-seleccionar varios sitios potenciales de trinchera en el sector del Páramo de Mucubají (Santo Domingo-San Rafael de Mucuchíes; referirse al Cuadro 2), donde dicha falla presenta excelentes rasgos geomórficos de fallamiento activo, se decidió conservar dos sitios: (1)- cerca de Apartaderos, en Morro de Los Hoyos, el cual fue finalmente excavado y estudiado; y (2)- cerca del Hotel Los Frailes, que aún está pendiente su estudio. El cuadro 2 puede considerarse como un ejemplo tipo de selección de sitios potenciales de trincheras

donde se describen las ventajas y desventajas de los sitios pre-seleccionados y se establecen prioridades. El taller tuvo lugar en febrero de 1997 y, como consecuencia de la excelente calidad de los datos obtenidos, esta experiencia resultó en una publicación científica de todos los participantes al taller (Audemard *et al.*, 1999b). El tamaño de la excavación fue sustancialmente reducido con respecto a estudios anteriores similares por encontrarnos dentro de un área protegida del Parque Nacional Sierra Nevada y sólo modificable con fines agropecuarios por los comuneros de Apartaderos. Esta trinchera fue abierta por un jumbo en algo menos de un día, alcanzando

Cuadro 2. Sitios potenciales de trinchera en el área de la laguna de Mucubají, estado Mérida-Venezuela (tomado de Audemard y Bellier, 1997)

Site N°	Location	Type of Property	Site Advantages	Site Disadvantages or Difficulties
1 Priority 3°	Mitibibó, Rangel District, Mérida State. East of Mitibibó creek and road. On Northern strand of Boconó fault	Private. Potato field Owner: Desiderio Sánchez who lives next to Mitibibó school No telephone	<ol style="list-style-type: none"> nice geomorphic evidences (trench, -3m fault scarp, 300m long shutter ridge); dry; narrow fault trace; easy access from nearest road 	<ol style="list-style-type: none"> some sharp bends the Mitibibó road that may generate some difficulties to Low Boy (backhoe transportation); rather coarse colluvial sedimentation; landowner's permit datable material may be scarce
2 Priority 3°	Llano del Hato (Las Mucuras), Rangel District, Mérida State. North of Astrophysical observatory and south of road linking Puerto Nuevo and Mitibibó. On northern strand of Boconó fault	Private. Along edge of potato field and nearby property access road. Owner: Claudio Pérez who can be contacted at Mática de Rosa gas station (Apartaderos) Tel. +58-74-660525	<ol style="list-style-type: none"> nice geomorphic evidences (wide trench, fresh -1 m high fault scarp); well-drained; interstratified organic-rich layers; easy access from nearest road; the excavation only needs to retouch an existing road cut, allowing it to be made by hand. 	<ol style="list-style-type: none"> few sharp bends on the Mitibibó- Puerto Nuevo road that may cause some difficulties to machinery transportation; some rather coarse deposits although interbedded with finegrained and/or organic layers; fault trace zone may be several meters wide; importance of human intervention and erosion unknown;
3 Priority 1°	Finca El Amparo (Agroampaca), Altos de Mucubají, Rangel District, Mérida State. North of main farm house and Mérida-Barinas national road. On northern strand of Boconó fault	Private. Pasture land. Owner: Luis Molina, who lives at the farm. Tel: +58-74-880142	<ol style="list-style-type: none"> nice geomorphic evidences (sag pond, fault scarp, small shutter ridge); easily accessible (close to main road); active peat accumulation; narrow fault trace; fine-grained alluvial wedge deposits 	<ol style="list-style-type: none"> poorly-drained and very high water table, except for the eastern edge of sag ponds; landowner's permit may be an unsolvable problem.

dimensiones de unos 20 m de largo, 3 m de ancho máximo (antes de parcialmente colapsar un sector de la misma cortado a expensas de una turbera activa; Figura 17) y unos 3 m de profundidad (unos 200 m³ aproximadamente). No obstante, merece mención que el escollo más difícil de vencer fue la capacidad negociadora del propietario de la Finca El Amparo, quien aún no daba su brazo a torcer para cuando los participantes internacionales estaban ya subiendo al páramo desde Barinitas por autobús. La obtención del permiso costó una sustancial dieta en efectivo, así como el acondicionar la excavación en “ojo de agua” a la conclusión del estudio.

Como consecuencia del sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997, PDVSA aporta los medios financieros para realizar investigaciones referentes al evento telúrico. Funvisis, bajo la coordinación de Audemard, ejecuta y estudia tres excavaciones paleosísmicas sobre la ruptura de dicho sismo en marzo-abril 1998 para evaluar la historia sísmica de dicho segmento de la falla de El Pilar. En vista del espacio físico reducido de los tres sitios seleccionados –correspondientes a los traspatios de tres viviendas localizadas en Las Manosas, Carrizal de la Cruz y Guarapiche-, las excavaciones realizadas con jumbo fueron modestas en sus dimensiones (unos 20 m de largo, 3 de



Figura 17. Vista general hacia el sur de la trinchera de Morro de Los Hoyos (Apartaderos, edo. Mérida) en la traza septentrional de la falla de Boconó. La pared oriental fue refilada al estilo japonés (paredes muy inclinadas), mientras la opuesta fue dejada tal como fue inicialmente excavada por el jumbo. Las turberas ubicadas hacia el fotógrafo demostraron ser muy inestables, mientras que las paredes cortadas a expensas de depósitos aluviales más consolidados no se desestabilizaron

ancho y 3 de profundidad). No presentaron problemas de estabilidad sus paredes aunque fueron lavadas con agua a presión. Un cuarto afloramiento –correspondiente a un corte antiguo hecho para la construcción de una vivienda en Terranova y ubicado por el Ing. Acosta– fue igualmente utilizado como apoyo a las excavaciones ejecutadas. Los resultados científicos derivados de este estudio están aún bajo evaluación, aunque algunos de ellos han sido ya publicados (Audemard, 1999b) y parecen muy promisoros dado que se han detectado más de 15 coluviones interdigitados (“colluvial wedge”) que identifican igual número de eventos en los últimos 6.000-7.000 años. El único factor desfavorable en estas tres excavaciones concierne al elevado costo invertido en dataciones radiocarbónicas debido al gran número (82) de muestras.

Factores condicionantes en los estudios por trincheras

De la experiencia venezolana ampliamente detallada en el aparte anterior, tanto en los aportes científicos en términos del comportamiento sismogénico de las fallas evaluadas como en los conocimientos adquiridos en la técnica de excavación y evaluación de las trincheras, se deriva que varios aspectos y diversos factores deben comulgar en un mismo sitio para que una evaluación paleosísmica por trincheras de exploración geológica sea exitosa. Estos pueden agruparse en dos grandes entidades:

factores del sitio geográfico y factores geológicos del sitio; estos últimos englobando aspectos tan disímiles como: estratigrafía, geomorfología, tectónica y geo-cronología, entre otros. A continuación, trataremos de discutir dichos factores condicionantes, con miras a presentar todos los aspectos que deben tomarse en consideración en la selección de un sitio de trincheras con fines de evaluación paleosísmica.

Condiciones del sitio geográfico

Uso y tenencia de la tierra. El tipo de propiedad –pública, comunitaria, privada y/o Parque Nacional– va a determinar en primera instancia si la localidad seleccionada podrá ser estudiada, y a quien se deberá recurrir para obtener los permisos pertinentes. También va a definir el tamaño de la excavación, el método de excavación, así como la condición final solicitada del área afectada por la excavación (reposición de las condiciones previas, construcción de reservorio o cualquier otra condición negociada). En el caso de propiedad privada, puede conllevar a la entrega de una indemnización acorde a solicitud del propietario luego de una negociación. En casos extremos, tales como excavaciones en Parques Nacionales, puede implicar compromisos como: excavar a mano; excavar trincheras de dimensiones reducidas (10 m de largo, 2 m de ancho y 2 m de profundidad); remover y reponer cuidadosamente la cobertura vegetal original; y obtener dificultosamente una permisología engorrosa, tediosa, pesada

y prolongada, aún utilizando canales gubernamentales que debiesen facilitar los procedimientos estipulados. Las excavaciones en propiedades compartidas, a caballo entre propiedades (caso Masuid; Figura 14) o en proceso de sucesión, son a evitar de antemano.

Accesibilidad al sitio. La calidad de la vialidad y/o la distancia del sitio a la vialidad principal va a condicionar el equipo de excavación a utilizar. Carreteras sinuosas aunque asfaltadas dificultan o imposibilitan el traslado de maquinaria pesada, ya que deben ser trasladadas sobre “lowboys” por no poder desplazarse por grandes distancias (superiores a los pocos kilómetros) por sus propios medios a riesgo de dañar piezas de los tractores con orugas, ya que los equipos acondicionados con neumáticos resultan ineficientes en condiciones difíciles de excavación; lo cual es generalmente el caso. La calidad de vialidad mínima recomendable son carreteras engranzonadas (tipo macadam), pero ocasionalmente se puede usar vías de acceso local en tierra si la región es seca (ej: Masuid, estado Falcón; Figura 13). La ausencia de vialidad o de calidad insuficiente condicionará que la excavación sea realizada a mano. La disponibilidad de mano de obra local económica puede definir igualmente que se excave a pico y pala; aunque no parece ser la condición existente en gran parte del territorio nacional.

Topografía del sitio. Los desniveles topográficos, así como la “rugosidad” del terreno, también influirán en la selección final del equipo de excavación; el todo

dependiendo de los requerimientos solicitados por el propietario de la parcela en cuanto al aspecto final del área intervenida. A título ilustrativo, una excavación a través de un escarpe de gran desnivel topográfico, tal como en Cordero en 1987 (Figura 8), y donde se requiera reponer la topografía original, no puede ser sólo excavada con un tractor porque se requiere dejar material removido en la parte alta de la excavación para su posterior colmatación; pero tampoco puede hacerse sólo con un jumbo porque la longitud del brazo de la pala no permite alcances y/o profundidades superiores a los 4,5-5 m. Por otra parte, la rugosidad del terreno va a ser determinante en la maniobrabilidad del equipo; por ende excluye aquellos equipos que requieren gran radio de acción o grandes espacios abiertos.

Maniobrabilidad en el sitio. El tamaño de la parcela, definida por los desniveles y “rugosidad” del terreno circunvecino, debe permitir el desplazamiento libre de los equipos de excavación seleccionados, así como la disposición de los escombros. El jumbo es el equipo más versátil en espacios reducidos, pero difícilmente permite excavar más allá de 5 m de profundidad, a menos de contar con excavadores de muy grandes dimensiones (como los utilizados en el Proyecto Hidroeléctrico Uribante-Caparo). Por el contrario, el tractor –el cual requiere más espacio de maniobrabilidad para disponer de los escombros y reingresar dentro de la excavación– es más eficiente en trincheras de mayor profundidad

(hasta unos 8 m en la experiencia venezolana), pero requiere espacios más grandes con desniveles moderados. En general, la profundidad alcanzada con un tractor es un décimo de la longitud necesaria a excavar: un objetivo de 8 m de profundidad implica ejecutar una excavación de unos 80 m de largo, si y solo si el terreno es relativamente plano (Figura 13c). En las trincheras ejecutadas por norteamericanos, japoneses u otros colegas, esta dificultad no existe porque mayormente ejecutan sus excavaciones con jumbo. Las trincheras japonesas son hechas con paredes muy inclinadas (Figura 17), mientras las norteamericanas tienden a tener paredes verticales, pero son soportadas por una estructura de andamios de tubo –como medida preventiva– que dificulta mucho la circulación dentro de la excavación, el fotografiado y levantamiento gráfico a mano de las paredes de la trinchera. En general y con fines de seguridad, se recomienda que la profundidad de la trinchera no supere su ancho; o en su defecto, construir bermas o descansos para aumentar la estabilidad de las paredes (Figura 2). Las trincheras venezolanas siempre han sido ejecutadas con sección trapezoidal donde la base es generalmente la mitad del ancho en superficie –el cual se asemeja a la profundidad final perseguida– (Figura 13c).

Vegetación del sitio. Si el sitio seleccionado está densamente cubierto por vegetación, esto implicará la consecución de los respectivos permisos ante las autoridades pertinentes (generalmente,

el Ministerio del Ambiente o equivalente) para su parcial deforestación, cuya área de afectación será definida por la maquinaria seleccionada. En caso de una propiedad privada, debe quedar claramente expreso durante la negociación quien se hará responsable de reforestar la parcela, si así lo requiriese la autoridad competente. Es decir, en caso de haber indemnización, si la misma cubre este rubro.

Mesa de agua. La presencia de agua en el sitio o a poca profundidad, así como en cursos de agua cercano al sitio, juega un rol preponderante en: a)- la ubicación definitiva de la excavación, donde deberá evitarse su presencia al máximo; b)- la profundidad final de la excavación; c)- el período del año en que se ejecutará la etapa de excavación de la misma, y su subsecuente estudio; d)- el tipo y peso de la maquinaria a utilizar; así como su eficiencia de trabajo en condiciones secas o mojadas (jumbo/tractor de orugas o tejas respectivamente) y e)- la preservación de la materia orgánica necesaria para la recolección de muestras para datación radiocarbónica –principal método geocronológico utilizado en depósitos jóvenes–. Desafortunadamente, uno de los mejores sitios para emplazar una excavación paleosísmica corresponde a las lagunas de falla en asociación a trazas activas, ya que generalmente satisfacen los otros factores geológicos que discutiremos ulteriormente. En tales circunstancias, se acometen generalmente otras obras de movimiento de tierra en paralelo, tales

como canales (ej.: Cordero en 1987; Figura 8) y calicatas profundas (ej.: La Grita en 1986) con miras a abatir la mesa de agua y/o a recolectar las aguas superficiales o de escorrentía. Adicionalmente, se prevee la excavación de una fosa en un lugar estratégico dentro del fondo de la trinchera para el achique constante, si es necesario, utilizando una motobomba (Figuras 13c y 16). La lógica dicta que en regiones lluviosas debe excavarse en el período seco, restringiendo la ejecución de las evaluaciones por trincheras a los meses noviembre-marzo en casi todo el territorio venezolano.

Estabilidad mecánica de los materiales.

Una revisión exhaustiva de las características geológicas del sitio a excavar permite preveer de antemano las posibles dificultades técnicas que pudiesen surgir durante la excavación. Además de la identificación de la presencia de agua, el determinar los tipos litológicos presentes en el sitio de excavación en función de los ambientes sedimentarios cuaternarios y activos en proximidad al sitio condiciona las estrategias de excavación a seguir. Por ejemplo, el reconocer la presencia de arenas finas no consolidadas (ambientes fluviales), bloques (depósitos de ladera o coluvio-torrenciales), paquetes potentes de arcilla (napas de desborde, lagunas de falla, ambientes lacustrinos, etc.) o turberas ayudarán a: a)- seleccionar el equipo de excavación (por ejemplo: grandes bloques puedan que no sean removidos por un tractor; un tractor de oruga no removerá material estando en un nivel arcilloso muy saturado; un

jumbo desestabilizará las paredes de una trinchera excavada en una secuencia rica en arenas no consolidadas; etc.); b)- diseñar la geometría final de la trinchera, ya que la cohesión de los materiales será determinante en la estabilidad mecánica de los cortes ejecutados; por ende define el grado de inclinación de las paredes (bien ilustrado en Figura 17); y c)- definir el método de lavado de las paredes de la trinchera: raspado en materiales granulares (Figura 2) y lavado en materiales más cohesivos con alternancia de granulares (Figura 18).

Condiciones geológicas del sitio

Simplicidad del accidente tectónico a escala regional. La escogencia de un sector de una falla geológica a evaluarse por trincheras debe considerar que mientras menor complicación estructural presente la falla a escala regional, menor será el número de trincheras que deberán excavarse sobre trazas o ramales subparalelos. No obstante, algunos autores (i.e: Pantosti, 1997) recomiendan escoger una falla que presente varios planos de falla (zona de falla) cubiertos por la longitud de la excavación, puesto que potencia la identificación de las distintas deformaciones cosísmicas (tal como en la trinchera de Mene Grande; Figura 5) y, en consecuencia, permite fácilmente derivar la historia sísmica del accidente evaluado en ese sector en particular.

Ubicación exacta de la traza a excavar.

El establecimiento de la localización precisa de la traza activa de la falla bajo evaluación es de una necesidad extrema,



Figura 18. Lavado de las paredes de la trincheras de Hato La Pica, con agua a presión. Nótese la nitida yuxtaposición de unidades sedimentarias introducida por la falla de Ancón, en la pared oeste

ya que permite reducir la longitud de la trincheras en el caso que no se requiera ir demasiado profundo con miras a exponer un registro geológico más extenso (Figura 13b). Debe quedar claro que una trincheras a igual profundidad expondrá mayor número de eventos sísmicos en una falla transcurrente –cuyo movimiento es esencialmente horizontal incorporando sólo pequeños desplazamientos verticales sub-ordinados- que en una falla de movimiento esencialmente vertical –fallas normales o inversas-. La determinación precisa –en unos cuantos metros a pocas decenas de metros de incertidumbre- de la traza activa resulta de un trabajo previo detallado de foto-interpretación de rasgos geomórficos

diagnósticos de fallamiento activo (*morfología de fallas activas*), seguido de un trabajo de verificación de campo (para más detalles, referirse a Audemard y Singer, 1997).

Materiales geológicos jóvenes. La trincheras debe exponer sedimentos cuaternarios blandos y jóvenes con miras a poder detectar deformaciones recientes, que a su vez puedan ser datados por los métodos convencionales más conocidos y utilizados (C^{14} convencional o por Espectrometría de Acelerómetro de Masa –Accelerometer-Mass Spectrometry o AMS–, termoluminiscencia –Thermoluminescence o TL–), o más raramente por: luminiscencia óptica estimulada –Optical Stimulated Luminescence o OSL–,

isótopos cosmogénicos –Be¹⁰, Al²⁶, He³–, racemización de aminoácidos y series del Uranio (U/Th). En algunas ocasiones, es posible hasta requerir de dataciones paleomagnéticas. Con fines paleosísmicos, no tiene ningún sentido exponer una falla, por ejemplo, con una expresión superficial magnífica si sólo afecta un granito de edad miocena.

Registro sedimentario continuo y de baja tasa de sedimentación. La localidad seleccionada debe preservar un registro geológico completo, aunque deformado frágil y/o dúctilmente por la falla en cuestión, con miras a detectar una historia sísmica igualmente completa. En consecuencia, la falla debe afectar un ambiente sedimentario sin evidencia de episodios erosivos; o ubicarse en una interfase donde un bloque tectónico esté afectado por erosión y el otro en continua acumulación, ya que las deformaciones cosísmicas introducen desniveles verticales que pueden modificar levemente el balance erosivo/sedimentario a escala muy local que justamente indican la ocurrencia de los *paleo-terremotos*. Por otra parte, las tasas tanto de erosión como de sedimentación no deben ser muy elevadas (rápidas) porque si no encontramos episodios sedimentarios masivos que pueden abarcar gran parte de la pared expuesta, lo cual reduce el número de ciclos sísmicos a poder ser determinados.

Estructuración y contrastes litológicos. Es deseable excavar la falla donde se intuya que ésta interfiera con ocurrencia de cambios laterales bien marcados o

abruptos (interdigitación), así como con sedimentos que presenten buena estructuración interna (laminación paralela, laminación cruzada, estratificación, intercalación rítmica, etc.). Esto facilita la identificación de las deformaciones cosísmicas.

Presencia de materiales datables. Por último pero no menos importante, los materiales deben ser jóvenes y datables por algunos de los métodos antes indicados. Algunos ambientes sedimentarios son más propicios que otros para la acumulación de materiales datables. En consecuencia, una buena previsión del contexto sedimentario a excavar permitirá minimizar los riesgos de fracaso en la obtención de dichos materiales. A título ilustrativo, una napa de desborde (ambiente fluvial de granulometría muy fina) tiene una alta potencialidad de ofrecer restos de materia vegetal bien preservada por las condiciones anóxicas inherentes a las arcillas, aunque contenga altos porcentajes de agua connata (tal como en la trinchera de La Grita; Figura 6). Por el contrario, una duna asegura la existencia de granos de cuarzo expuestos al sol de manera prolongada que pudieran ser datados por TL o OSL, pero es posible que dicha duna por falta de cementación no conserve una buena estructuración interna que entonces enmascararía la deformación cosísmica.

En climas tropicales, los métodos geocronológicos más empleados con fines paleosísmicos son en orden de importancia: el método del C¹⁴ que requiere de materia orgánica en cualquiera de sus

formas (madera, carbón, suelo orgánico enriquecido, esqueletos calcáreos o conchas), la serie del Uranio (aplicada esencialmente a terrazas marinas constructivas) y menos frecuentemente: TL (aplicado a depósitos expuestos al sol, utilizándose granos de cuarzo o feldespato) y paleomagnetismo (magnetismo remanente depositacional; usado en arcillas). Los cosmonucléidos y OSL son métodos aún en su fase experimental y de desarrollo, pero ya están siendo empleados en nuestras latitudes.

Perspectivas

El futuro de esta disciplina en Venezuela apunta hacia la densificación del número de trincheras, tanto sobre los accidentes parcialmente evaluados como sobre los aún no estudiados, con miras a ofrecer nuevas luces en varios aspectos sin resolver tales como: 1)- potencial sismogénico (la repetición de los sismos máximos probables) de las fallas activas conocidas; 2)- segmentación (sismogénica) de fallas; 3)- interacción de fallas vecinas o de segmentos de fallas contiguos, como consecuencia de variaciones en los campos de esfuerzos introducidos por el desplazamiento cosísmico de una ruptura responsable de un evento sísmico; 4)- distribución espacio-temporal de la actividad sísmica a lo largo de una falla dada; 5)- asociación sismotectónica de sismos históricos; 6)- ocurrencia del último evento; y 7)- probabilidad de ocurrencia del próximo. Igualmente,

puede permitir precisar o refinar: la tasa de desplazamiento promediada de la falla, el desplazamiento cosísmico por evento, la proporción de las componentes vertical y horizontal de movimiento y la cinemática de la falla por intermedio de la observación directa de la estría.

Igualmente, pensamos que la excavación de trincheras/calicatas o la recuperación de núcleos continuos para el análisis de paleolicuación aportará luces sobre la ocurrencia de eventos históricos y prehistóricos, e igualmente permitirá determinar la superficie del área de afectación por este fenómeno inducido en ocasión de tales eventos –permitiendo derivar la magnitud del evento–. La licuación de los suelos ha resultado ser un proceso de desestabilización del suelo tanto o más nocivo que el propio movimiento del terreno en ocasión de los terremotos moderados a grandes. Es decir que se podrá determinar la susceptibilidad de los suelos a licuar, en función del análisis de fenómenos similares preservados en el registro geológico. En cuanto a los otros métodos indirectos de evaluación paleosísmica, mucho queda aún por recorrer ya que sólo se ha invertido poco esfuerzo en ello, como por ejemplo en: levantamiento/hundimiento de elementos geomórficos planares –superficies de erosión, terrazas marinas y aluviales–, comportamiento de la red de drenaje, deformaciones permanentes del terreno inducidas por la sismicidad diferentes a la ruptura cosísmica licuación e inestabilidad de masas–, registros sedimentarios anómalos –tsunamis y turbiditas–, etc.

Conclusiones

Aunque en Venezuela se haya aplicado el enfoque paleosísmico esencialmente por el intermedio de excavación de trincheras a través de accidentes tectónicos que presenten expresión superficial, esta técnica en nuestro contexto tectónico activo venezolano ha demostrado ser de mucha utilidad por lo distribuido de nuestra deformación activa, lo cual repercute en que la duración de los ciclos sísmicos de las fallas o de los segmentos de falla de manera individual supere ampliamente las ventanas de observación de los registros sísmicos instrumentales e históricos sumadas. La contribución primordial de esta técnica o disciplina, sólo después de haber realizado una evaluación neotectónica detallada, se orienta hacia un mejor conocimiento de: la actividad holocena de las fallas, el desplazamiento cosísmico, la velocidad o rata de desplazamiento promediado, la segmentación de fallas, la magnitud y recurrencia de sismos históricos y prehistóricos, la asociación sismotectónica de los sismos históricos y la evolución morfológica del paisaje a corto y largo plazo a consecuencia de la tectónica.

En el caso particular venezolano, progresos quedan por hacer en todos los campos antes indicados debido al alto grado de distribución de la deformación activa dentro del cinturón montañoso y sismotectónico de más de 100 km de ancho que nos surca desde el estado Táchira hasta el Golfo de Paria. Es decir, que son aún numerosas las fallas y los

segmentos de ellas que restan aún por evaluar.

No obstante, además de los aportes en los campos antes mencionados, la práctica reiterada de esta técnica en Venezuela ha llevado a un “*savoir faire*” para identificar los aspectos geográficos y geológicos de sitio que conllevan a asegurar el éxito en las investigaciones paleosísmicas por trinchera. Entre los aspectos geográficos del sitio a considerar están, en función de la maquinaria a utilizar: uso y tenencia de la tierra, accesibilidad al sitio, topografía del sitio, maniobrabilidad en el sitio, vegetación del sitio, mesa de agua y estabilidad mecánica de los materiales a excavar. Los factores geológicos a evaluar más importantes incluyen: simplicidad del accidente a escala regional, ubicación exacta de la traza activa, materiales geológicos jóvenes, presencia de materiales datables, registro sedimentario continuo y de baja tasa de sedimentación, presencia de estructuración y contrastes litológicos.

Agradecimientos

Por el presente artículo, el autor quiere hacer un reconocimiento público a aquellos que lo encaminaron en esta línea de investigación: Jean-Pierre Soulas –de quien hemos siempre esperado que publicase mucho más- y André Singer. Las discusiones con este último fueron la única forma de poder hacer posible la retrospectiva aquí presentada, puesto que fue el único profesional de FUNVISIS

quien vivió, aunque de forma indirecta en ocasiones, todas las excavaciones realizadas en territorio nacional hasta el presente. Igualmente, a Carlos Giraldo quien compartió conmigo mis primeros sinsabores durante la apertura de la trinchera de La Grita, aunque luego tuvo que ocuparse de aquellas de Caja Seca-Alguacil y no nos acompañó durante el estudio en sí. Por otra parte, deseo agradecer a todos aquellos que directa (José Antonio Rodríguez, Rogelio González, Feliciano De Santis, Jean-Claude Bousquet, Carlos Chacín, Alfonso Adrianza, André Singer y los participantes de SAWOP) o indirectamente (con financiamiento, obtención de los acuerdos de los propietarios, permisología, acogidas locales, etc.) contribuyeron en la realización de aquellas evaluaciones coordinadas por mi persona.

Referencias citadas

- AUDEMARD, F. A. 1993. Trench investigation across the Oca-Ancon fault system, Northwestern Venezuela. *Second International Symposium on Andean Geodynamics*. 51-54.; Oxford, England. (Extended abstract).
- AUDEMARD, F. A. 1996. *Paleoseismicity studies on the Oca-Ancon fault system, northwestern Venezuela*. **Tectonophysics**, 259: 67-80.
- AUDEMARD, F. A. 1997. *Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: trench confirmation*. **Journal of Geodynamics**, 24(1-4): 155-167.
- AUDEMARD, F. A. 1998. *Contribución de la paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y de 1894 en los Andes venezolanos meridionales*. **Revista Geográfica Venezolana**, 39(1-2):87-105.
- AUDEMARD, F. A. 1999a. *Morpho-Structural Expression of Active Thrust Fault Systems in the Humid Tropical Foothills of Colombia and Venezuela*. **Zeitschrift für Geomorphologie**. 118:1-18.
- AUDEMARD, F. A. 1999b. Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar, Venezuela nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos. *VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Mérida, Venezuela. (CD-ROM).
- AUDEMARD, F. A. y BELLIER, O. 1997. *Trenching site selection for paleoseismic assessment on the Bocono fault, southern Venezuelan Andes*. **Bulletin INQUA Neotectonics Commission** N° 20. 4pp (Pre-print). También en Web: http://io.ingrm.it/sfit/Bocono_1996.html.
- AUDEMARD, F. A., BOUSQUET, J-C. y RODRÍGUEZ, J. A. 1995. *Paleoseismicity Studies on a Natural Outcrop: the Urumaco Fault Case, Falcón Basin, Northwestern Venezuela*. **Bull. INQUA N. C.**, 18: 48 (abstract).
- AUDEMARD, F. A., BOUSQUET, J-C. y RODRÍGUEZ, J. A. 1999a. *Neotectonic and Paleoseismicity studies on the Urumaco fault, northern Falcón basin, northwestern Venezuela*. **Tectonophysics**. 308: 23-35.

- AUDEMARD, F. A. y DE SANTIS, F. 1991. *Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes*. **Bull. IAEG/AIGI**, N° 44: 5-16.
- AUDEMARD, F. A.; PANTOSTI, D.; MACHETTE, M.; COSTA, C.; OKUMURA, K.; COWAN, H.; DIEDERIX, H. y Sawop Participants. 1999b. *Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes)*. **Tectonophysics**, 308: 1-21.
- AUDEMARD, F. A.; RODRÍGUEZ, J. A. y BOUSQUET, J.-C. 1997. Holocene tectonic uplift of La Vela anticline related to the activity of the Guadalupe Thrust, northern Falcón State (Venezuela). *Proceedings IV CLIP Meeting -1995-* (J. Mecó & N. Petit-Maire; eds.). Servicio de Publicaciones Univ. de Las Palmas de Gran Canaria: 13-27.
- AUDEMARD, F. A. y SINGER, A. 1994. Parámetros sismotectónicos para fines de evaluación de la amenaza sísmica en el noroccidente de Venezuela. *VII Cong. Venezolano Geof.*: 51-56. Caracas, Venezuela (04-08 septiembre).
- AUDEMARD, F. A. y SINGER, A. 1996. *Active Fault Recognition in Northwestern Venezuela and its Seismogenic Characterization: Neotectonic and Paleoseismic approach*. **Geofísica Internacional** 35(3): 245-255.
- AUDEMARD, F. A. y SINGER, A. 1997. La Ingeniería de Fallas Activas en Venezuela: historia y estado del arte. *Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica: Aniversario del Terremoto de Caracas de 1967*. Universidad, Católica Andrés Bello, Caracas. 11-27.
- AUDEMARD, F. A. y SOULAS, J.-P. 1995. Trench Confirmation of Historical Earthquakes on the Boconó Fault System, Southern Venezuelan Andes. *XIVINQUA International Congress -Symposium on Paleoseismology-*; Berlín, Germany. *Terra Nostra*, 2/95: 16.
- AUDEMARD, F. E. 1991. *Tectonics of Western of Venezuela*. Ph.D. Thesis, Rice University, Texas, 245 p + anexos.
- BELTRÁN, C.; GIRALDO, C. y SINGER, A. 1990. *Evaluation of recent tectonic activity of the Boconó fault near Barquisimeto (Venezuela) based on trench observation*. **Bull. INQUAN. C.**, 13: 51 (abstract).
- BELTRÁN, C.; RODRÍGUEZ, J. A.; SINGER, A. y RIVERO, C. 1999. La trinchera de Las Toscanas. Evidencias paleosismológicas de actividad reciente de la falla de El Pilar entre Casanay y Río Casanay. *VI Cong. Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Mérida, Venezuela (CD-ROM).
- BELTRÁN, C.; SINGER, A. y RODRÍGUEZ, J. A. 1996. The El Pilar fault active trace (Northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. *3rd International Symposium on Andean Geodynamics*: 153-156. Saint-Malo, France (extended abstract).
- CLUFF, L. y HANSEN, W. 1969. *Seismicity and seismic geology of Northwestern Venezuela*. Woodward-Clyde & Associates. 2 vol. Shell de Venezuela. 78 p. Inédito.
- DE TONI, B. y KELLOGG, J. 1993. *Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern flank of the Venezuelan Andes*. **Tectonics** 12(6): 1393-1409.

- DUERTO, L.; AUDEMARD, F. E.; LUGO, J. y OSTOS, M. 1998. Síntesis de las principales zonas triangulares en los frentes de montaña del occidente venezolano. *IX Congreso Venezolano de Geofísica* (CD-ROM; trabajo # 25).
- FUNVISIS. 1983. *Estudio de Riesgo Sísmico. Proyecto Uribante-Caparo*. CADAPE. 145 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS. 1987a. *Actividad cuaternaria y características sismogénicas del sistema de fallas de Oca-Ancón y de las fallas de Lagarto, Urumaco, Río Seco y Pedregal. Afinamiento de las características sismogénicas de las fallas de Mene Grande y Valera*. Proyecto COLM II. MARAVEN. 69 p. Inédito.
- FUNVISIS. 1987b. *Tectónica cuaternaria, características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y del piedemonte occidental andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad histórica*. Proyecto Sumandes. MARAVEN. 90 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS. 1991a. *Características neotectónicas y parámetros sismogénicos de las fallas activas cuaternarias y efectos geológicos de la actividad sísmica en la región de proyecto y en las obras proyectadas*. Proyecto SUMANDES II. MARAVEN. 2 Vol. 239 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS. 1991b. *Actividad cuaternaria y caracterización sismogénica de las fallas de Lagarto y Río Seco. Afinamiento de las características sismogénicas del sistema de fallas de Oca-Ancón y de Urumaco*. Proyecto Suministro Falcón -Zulia (SUFAZ). MARAVEN. 91 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS. 1991c. *Estudios de las manifestaciones de licuefacción de suelo ocurridas en Falcón Oriental durante los sismos de Abril y Mayo de 1989. Aspectos geológicos y geotécnicos*. INTEVEP. 123 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS. 1994. *Estudio neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela*. Proyecto INTEVEP 92-175. INTEVEP. 3 Vol. 258 p + anexos. Inédito.
- GHAFFIRI, A.; SAURET, B.; ROSIQUE T.; BLES, J-L. y SEBRIER, M. 1993. Mise en evidence d'un paleoseisme sur la faille de la Moyenne Durance. *Géologie Alpine. Série speciale Résumés de colloques: 2:24-25*. Chamberry, Francia (18-19 mayo). (Abstract).
- GRELLET, B.; COMBES, Ph.; GRANIER, Th. y PHILIP, H. 1993. *Sismotectonique de la France metropolitaine dans son cadre géologique et géophysique. Mém. Soc. Géol. France*, 2 Vol., 164:1-75 + anexos. Soc. Géol. France, Paris.
- LAFFAILLE, J.; FERRER, C. y RENGIFO, M. 1998. *Los modernos cazadores de terremotos: el "South American Workshop on Paleoseismology" (SAWOP), Febrero 1997, Andes de Venezuela. Revista Geográfica Venezolana*, 39(1-2):327-338.
- McCALPIN, J. 1996. **Paleo-seismology**. Academic Press ltd., London. 588 p.
- PANTOSTI, D. 1997. Modern Approaches in Paleoseismology. En: **Historical and Pre-historical Earthquakes in the Caucasus**. NATO ASI Series.
- SINGER, A. y AUDEMARD, F.A. 1997. Aportes de Funvisis al desarrollo de la Geología de

Fallas Activas y de la Paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico.

En: Grases, J. (Ed.) **Diseño sismo-resistente: especificaciones y criterios empleados en Venezuela.**

Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, XXXIII: 25-38, Caracas.

SOULAS, J.P. 1988. Analyse paléosismique par tranchées exploratoires – Exemples au Vénézuéla. *Colloque Méthodologie et Applications de la Néotectonique*: 42-43. BRGM, Orléans, France (abstract).

SOULAS, J.P. y GIRALDO, C. 1994. Características sismogénicas de las fallas de Oca-Ancón, Mene Grande y Valera. (Región Noroccidental de Venezuela). *VII Cong. Venezolano Geof.*: 35-42. Caracas, Venezuela.

TUTTLE, M.; LAW, T.; SEEBER, L. y JACOB, K. 1990. *Liquefaction and ground failure in Ferland, Quebec triggered by the 1988 Saguenay earthquake.* **Canadian Geotechnical Journal** 27:580-589.