

Estudio paleosísmico

en la traza activa de la falla El Ávila, Santa Rosa, Caracas, Venezuela

Paleoseismic studies in the active trace of El Ávila fault, Santa Rosa, Caracas, Venezuela

Luz M. Rodríguez

Reinaldo Ollarves

Franck Audemard

André Singer

Sirel Colón

Chantal Miró

Hewart Viète

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).
Departamento de Ciencias de la Tierra,
Caracas, Venezuela
lrodriguez.funvisis@gmail.com

Resumen

El sitio de trinchera se ubica en Santa Rosa, al este de Caracas. En este sector, la falla corta una secuencia de depósitos de ladera adosados al pie del macizo del Ávila, y presenta evidencias de movimiento de tipo transcurrente dextral con componente normal. La datación ^{14}C de los marcadores de fallamiento obtenidos en la trinchera, estima que el período de retorno del sismo estaría en el orden de 3.200-3.500 años de magnitud máxima probable de 6,9 Mw, con una tasa de velocidad de desplazamiento promedio de 0,3 mm/año. La traza activa de la falla se encuentra sellada por depósitos de flujos torrenciales que no han sido deformados desde la ocurrencia del evento paleosísmico más reciente datado en 2.700 años antes del presente (750 años AC). La datación ^{14}C de la secuencia de estos flujos torrenciales arroja un período de retorno de los mismos en el orden de 400 a 500 años. Es decir han transcurrido un poco más de 500 años desde el último evento datado.

Palabras clave: falla El Ávila; historia paleosísmica; amenaza sísmica; Caracas.

Abstract

The site of trench is located in Santa Rosa, to the east of Caracas. In this sector, the fault's active trace cuts a sequence of colluvial deposits contiguous to the foot of the Ávila, and presents evidence of transcurrent dextral movement with normal component. Based on the ^{14}C dating of the fault markers obtained in the trench, it is estimated that the seism period of return is within the range of 3200-3500 years with earthquakes of 6.9 Mw probable maximum magnitude and the fault's movement speed average of 0.3 mm/year. The fault's active trace has been sealed by deposits of torrential flows that have not been deformed since the most recent paleoseismic event dated at 2700 years before the present (750 years BC). The ^{14}C dating of these flows sequence suggests a return period about 400 to 500 years. In other words, barely over 500 years have passed since this last dated event.

Key words: El Ávila fault; paleoseismic history; seismic hazard; Caracas.

1. Introducción

La distribución espacial de los epicentros de los sismos históricos e instrumentales registrados en Venezuela atestigua que las principales ciudades del país se encuentran construidas en zonas sísmicamente activas, controladas por fallas que evidencian claras huellas de actividad tectónica reciente y que, por lo tanto, son capaces de generar terremotos cada cierto tiempo, unas con mayor intervalo de recurrencia que otras. No obstante, el registro histórico de la actividad sísmica del país abarca un poco más de 500 años; es decir una ventana de tiempo muy restringida a escala geológica. Aunque los accidentes sismogénicos de mayor potencial como los sistemas de fallas de Boconó, San Sebastián y El Pilar, presentan períodos de recurrencia del orden de 300 a 450 años (Audemard, 1998; Audemard *et al.*, 2000), muchas de las demás fallas activas en el norte del país, sobrepasan este lapso, como es el caso del sistema de fallas Oca-Ancón, cuyos sismos característicos alcanzan períodos de recurrencia del orden de 1.900 años para la falla de Ancón y 4.300 años para la de Oca (Audemard, 1993; 1996). Gracias a los estudios de paleosismología efectuados en Venezuela desde hace más de 30 años, se logró afinar los parámetros sismogénicos de un número apreciable de fallas activas, información esta de vital importancia para la evaluación de la amenaza sísmica (Singer y Audemard, 1997; Audemard, 2003; Audemard, 2005).

En la región centro-norte del país, la fuente tectónica de mayor significado sismogénico corresponde al sistema de fallas de San Sebastián, que se extiende costa afuera en el lecho submarino y es

por lo tanto inaccesible, con la excepción de un tramo de 7 km reconocido en tierra por Weisbord (1957), previamente a la construcción del actual aeropuerto Internacional Simón Bolívar de Maiquetía, en el estado Vargas.

No obstante, es importante resaltar que a todo lo largo de estos sistemas sismogénicos principales existen también fallas de menor longitud, pero capaces de generar sismos de magnitud moderada ($\leq 6,5-6,8 M_w$), que es necesario evaluar detenidamente, como es el caso del sistema Tacagua-El Ávila, en su condición de fuente local de amenaza sísmica para la ciudad capital, los centros urbanos y las infraestructuras de importancia vital más cercanas a la misma (Figura 1).

En consecuencia, el presente estudio paleosísmico tiene como objeto evaluar la actividad geológica reciente de la falla El Ávila. Este conocimiento reviste una importancia estratégica, sobre todo en consideración al silencio que caracteriza la actividad sísmica de esta falla y la incertidumbre concerniente a la traza activa de la misma.

2. Traza activa de la falla Tacagua-El Ávila

Las exigencias de selección de un sitio favorable para la excavación de una trinchera paleosísmica en el sistema de fallas Tacagua-El Ávila, han conducido al reconocimiento detallado de la actividad tectónica reciente a lo largo de la traza convencional conocida de este accidente estructural (Aguerrevere y Zuloaga 1937; Dengo, 1951; Wehrmann, 1972; Rial, 1973; Singer, 1974, 1977a; Fanti, *et al.*, 1980; FUNVISIS, 1983; Suarez y Nábelek 1990; Acosta, 1997 y

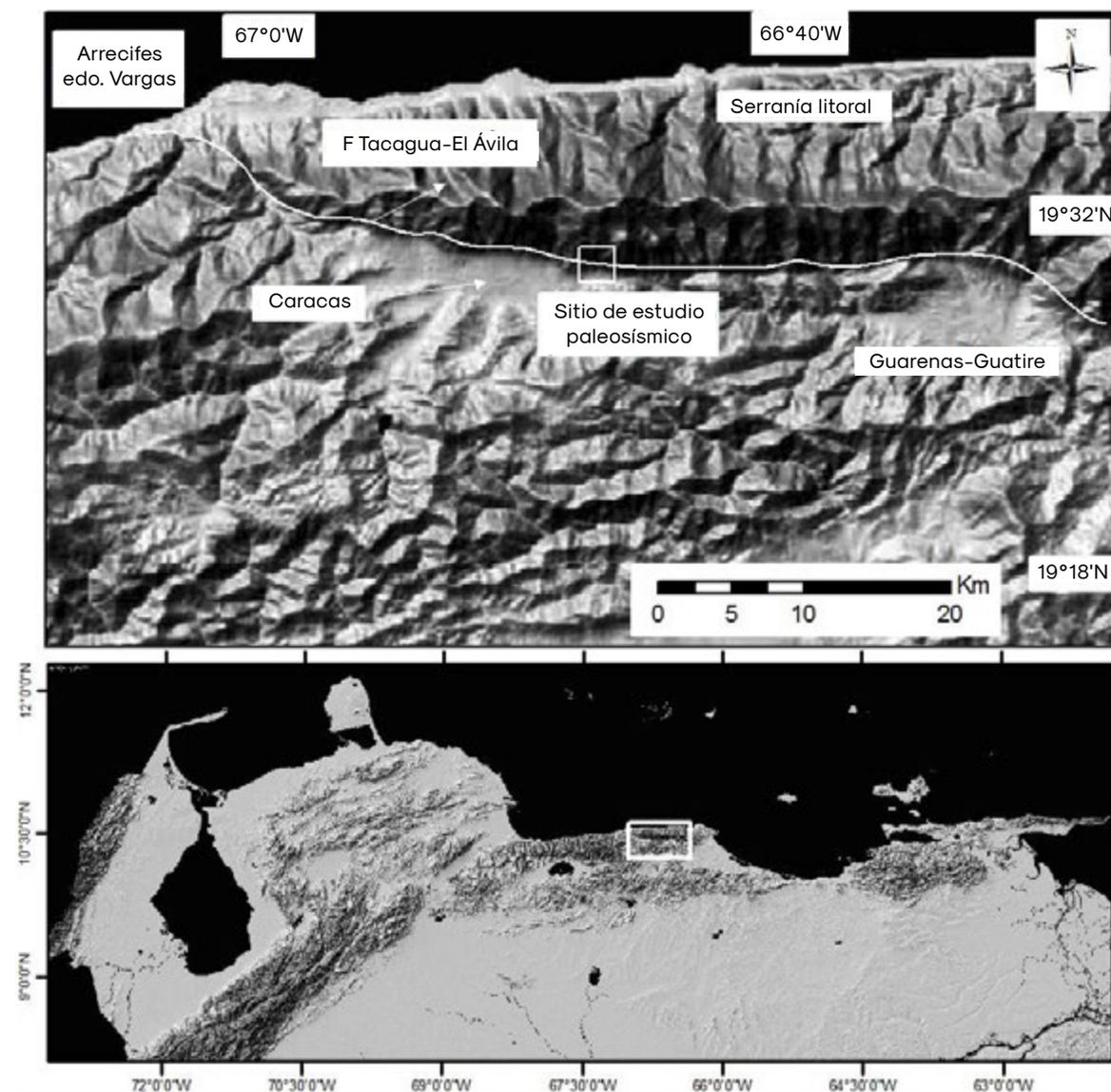


Figura 1. Ubicación relativa del sitio de trinchera paleosísmica y del sistema de fallas Tacagua-El Ávila, entre Arrecifes y Guatire, serranía Litoral de la cordillera de la Costa, región centro-norte de Venezuela.

Fuente: Modificado de Garrity *et al.*, 2004

Singer *et al.*, 2007). A tal efecto, se aprovecharon las fotos aéreas de la Misión 8 (años 1936-39) y 172 (año 1961) del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IG-VSB), que constituyen un recurso valioso, para la interpretación de las características estructurales y neotectónicas del corredor de fallas, así como para la selección de un sitio de trinchera paleosísmica. Ollarves *et al.*, (2007) realizaron la cartografía neotectónica del sistema de fallas Tacagua-El Ávila entre la costa cerca de Arrecifes (estado Vargas) hasta el poblamiento de Guatire (estado Miranda); esta falla controla el margen norte de las depresiones tectónicas de Caracas y de Guarenas-Guatire (Figura 2). El movimiento reciente entre Arrecifes y Guatire se obtuvo de las evidencias diagnósticas identificadas a lo largo de la traza activa cartografiada y confirmada en campo, ratificando el carácter dextral con una componente normal del movimiento de la misma.

Entre Guatire e Higuerote, la prolongación de la traza activa es aún mal conocida y no fue evaluada en este trabajo. En el mapa geológico regional, referencia 6947-III-NE por Urbani y Rodríguez (2004), aparece inferida como un trazo de línea segmentada desde la población de Araira pasando por los valles de Chuspita, Salmerón y Birongo para continuar con dirección a la población de Barlovento en el estado Miranda. También en las imágenes de radar se evidencia un lineamiento que hace pensar que la falla se extiende hasta la región de Higuerote; es una zona que debe ser estudiada a partir de imágenes aerofotográficas y de misiones de campo para corroborar si hay evidencias de actividad cuaternaria en esta región.

A los fines de evaluar la amenaza sísmica para esta falla, se consideraron los criterios de segmentación propuestos por Audemard *et al.* (2000). A ambos lados de la inflexión pronunciada de la traza de esta falla entre Plan de Manzano y Catia (Figura 2). Al oeste de esta inflexión el segmento Tacagua abarca una extensión de 15 km entre Arrecifes y Catia (Figura 2a), con un rumbo N70°O; en cuanto al segmento El Ávila ubicado al Este de la inflexión entre Catia y Guatire, (Figuras 2b1, b2 y b3), su extensión reconocida abarca unos 50 km con un rumbo general O-E, y controla el piedemonte sur de la serranía del Ávila. Es de hacer notar que la referida inflexión no constituye sino una barrera relativa significativa, debido al movimiento transcurrente transtensivo de la falla.

A continuación se describen las características de cada segmento señalado.

2.1 Segmento Tacagua

Entre la costa y el río Mamo, la falla sigue un rumbo N60°-70°O, en dirección del Cerro Negro donde corta rocas metamórficas y genera bermas, además de drenajes desviados y desplazados en forma dextral. En el mismo Cerro Negro se midieron desplazamientos de tipo lateral dextral en el orden de 50 a 150 m (Figura 3), con un desplazamiento vertical que levanta el bloque norte a contra-pendiente, y el cual se evidencia claramente en la bajada de la Autopista Caracas-La Guaira pasando el túnel de Boquerón 1, por el desnivel correspondiente de un remanente de superficie de aplanamiento de probable edad plioceno, la cual antefecha el probable inicio de la actividad neotectónica de la falla (FUNVISIS, 1983). Mediciones microtectónicas

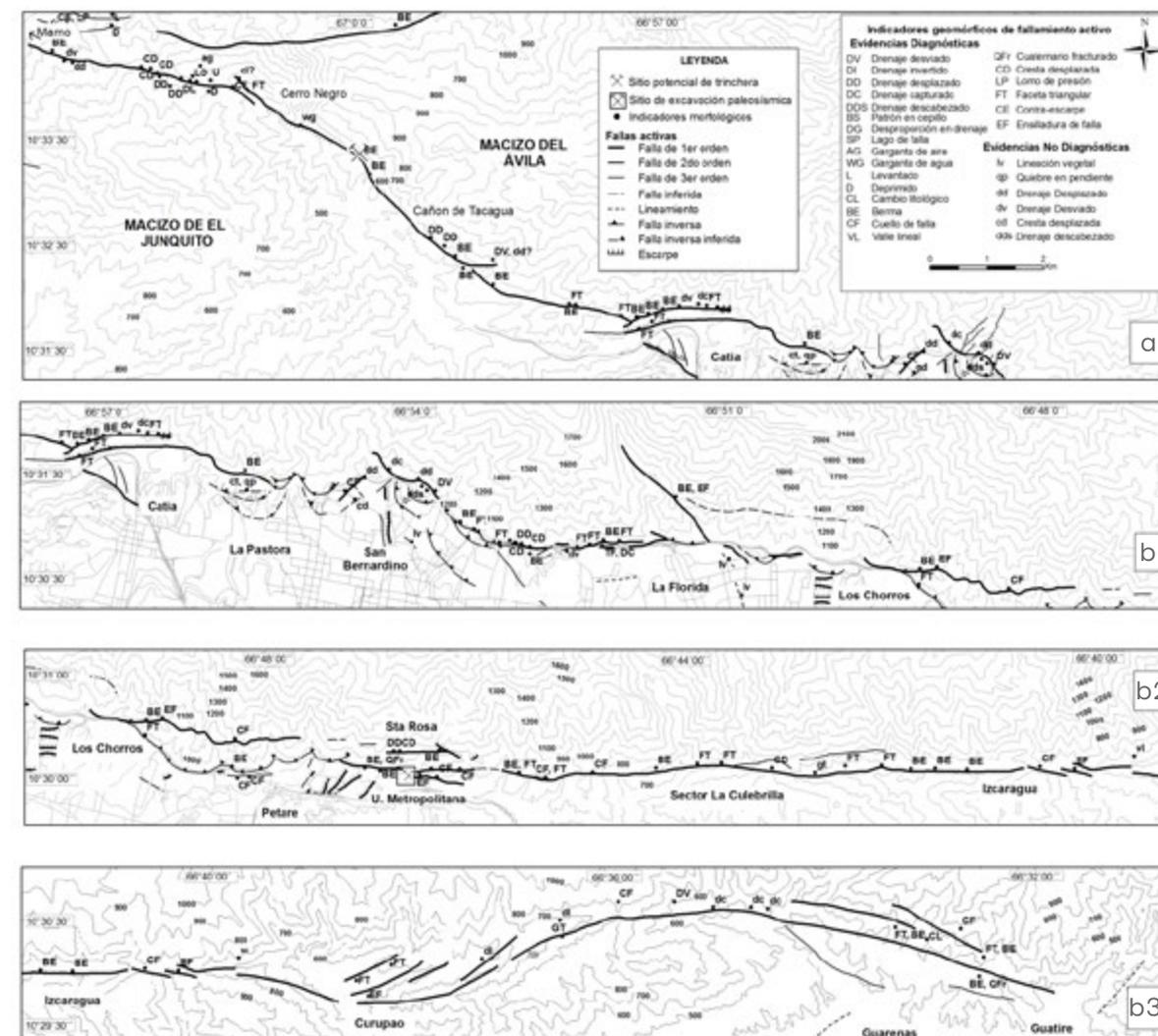


Figura 2. Trazado del sistema de fallas Tacagua-El Ávila. Evidencias morfológicas de actividad tectónica reciente. (a) segmento Tacagua, desde la cercanía de Mamo hasta Catia; (b1) segmento Ávila, sección entre Catia y Los Chorros, (b2) segmento Ávila, sección entre Los Chorros hasta Izcaragua, (b3) segmento Ávila, sección entre Izcaragua y Guatire.

Fuente: Modificado de Ollarves *et al.*, 2007

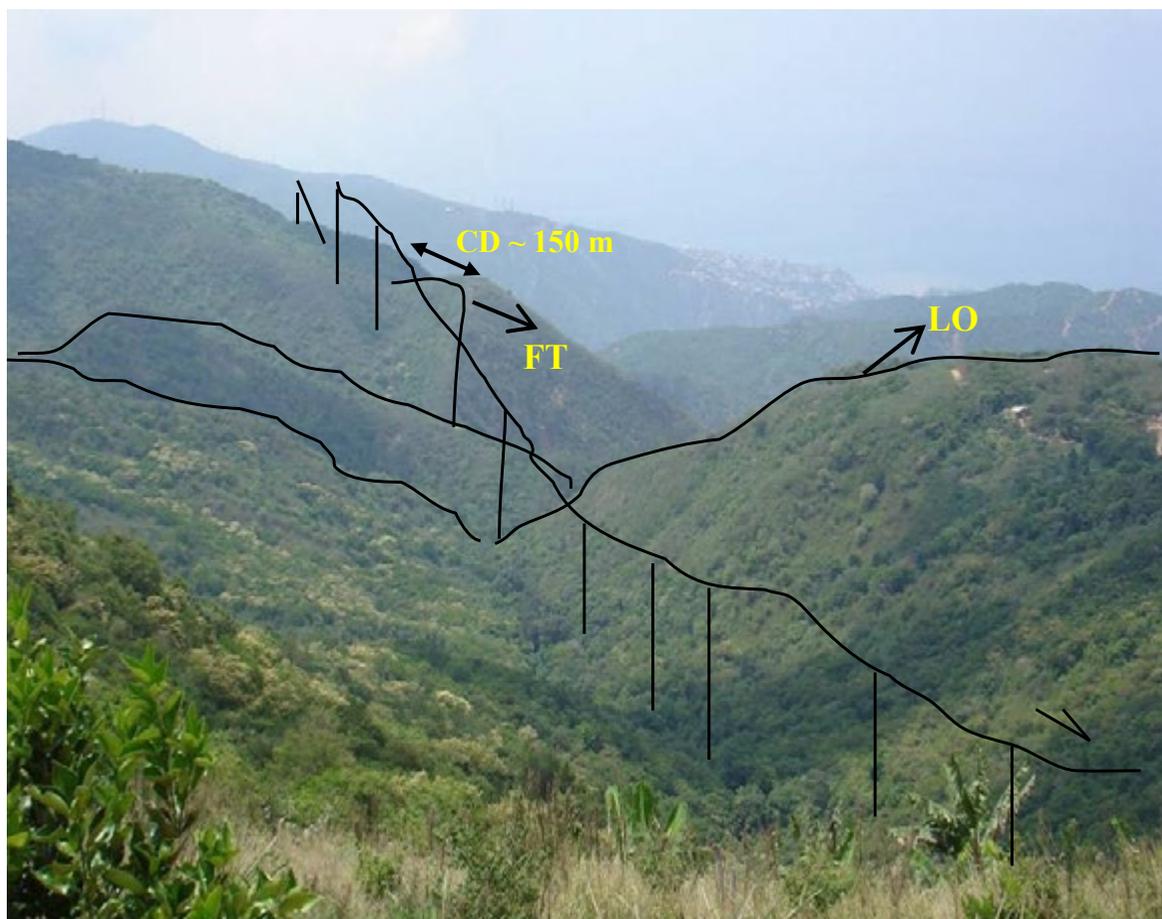


Figura 3. Expresiones neotectónicas diagnósticas de la falla Tacagua en Cerro Negro: LO: lomo de obturación; FT: faceta triangular, CD cresta desplazada. Foto: Ollarves, 2007

efectuadas por Acosta (1997), indican la ocurrencia de dos movimientos: el más viejo de componente normal, y el más reciente de tipo transcurrente dextral. En dirección a Plan de Manzano, la falla de Tacagua tuerce su rumbo para adoptar una dirección general cercana a O-E (Figura 2a), y deja de llamarse Tacagua para pasar a ser la falla El Ávila.

2.2 Segmento El Ávila

Este segmento de falla de dirección E-O asegura la articulación del macizo del Ávi-

la con las depresiones tectónicas de Caracas y Guarenas-Guatire, y controla el estrecho valle de falla ubicado entre estas poblaciones. La traza activa del segmento El Ávila presenta una longitud tres veces mayor que el segmento Tacagua y se encuentra subrayado por la geometría de escarpes de falla con facetas triangulares. Por las características morfológicas del segmento, la falla El Ávila se ha dividido en dos tramos, el primer tramo de falla se ha denominado Caracas (entre Catia y La Urbina) y el segundo tramo de falla llamado Caracas-Gua-

tire (entre La Urbina y Universidad Metropolitana hasta Guatire). La velocidad de la falla El Ávila fue estimada por Audemard *et al.*, (2000), en 0,4 mm/año, con un período de retorno de 2.500 años, para generar un sismo máximo probable de 6,8 Mw.

2.2.1 Tramo Caracas

A lo largo del piedemonte sur del Ávila, la falla sigue un rumbo general O-E y se expresa en la morfología por medio de escarpes tectónicos (Figura 2b1).

A lo largo de la Av. Boyacá (Cota Mil), los abanicos fluvio torrenciales del valle de Caracas se encuentran cruzados en forma de tijera, como reflejo de una componente vertical inversa en este tramo de falla (Singer, 1974; 1977a y Singer *et al.*, 2007). En la Puerta de Caracas (La Pastora), la traza alabeada del sistema de falla define el contacto estructural entre los abanicos piemontinos y el macizo rocoso, además flexura el cuerpo de las referidas acumulaciones cuaternarias. Este dispositivo morfoestructural se evidencia en particular en los abanicos del Pleistoceno inferior de La Pastora y de San Bernardino y en los del Marqués, en ambas extremidades oeste y este del valle de Caracas, donde el trazado de la falla sufre inflexiones sigmoidales de importancia.

En el sector de Boleíta-Los Chorros, la falla presenta dos trazas activas, una principal muy rectilínea al norte, y la otra alabeada al sur. La traza norte constituye la prolongación de la falla El Ávila y se adentra en el macizo rocoso entre el escarpe de falla identificado en la salida este del viaducto de Los Chorros y el distribuidor de la quebrada Galindo; la traza sur asegura el contacto entre el macizo rocoso de

los abanicos piemontinos del Pleistoceno inferior a modo de escama tectónica y de acuerdo con un patrón geométrico similar observado en la extremidad oeste del valle de Caracas, advertido por Dengo (1951) en la cartografía de esta falla.

2.2.2 Tramo Caracas-Guatire

Entre las depresiones tectónicas de Caracas, Guarenas y Guatire, la traza de este tramo de la falla se reconoce por medio de un profundo y estrecho valle de falla rectilíneo, excavado por la erosión diferencial, y a expensas de un marcador morfoestructural de extensión regional constituido por la superficie de aplanamiento de 1.200 msnm de probable edad pliocena (Singer, 1977b), correspondiente a la envolvente topográfica del bloque deprimido piemontino (Figura 4). De esta manera, la morfología de erosión diferencial entallada o excavada por el drenaje a lo largo de la traza de la falla, dificulta la obtención de evidencias de actividad neotectónica susceptibles de presentarse a lo largo de la misma (Figura 2b2; 2b3), como suele ocurrir en la morfología ‘criptotectónica’ de fallas activas desarrolladas en ambiente climático muy húmedo (Cotton, 1950; Bloom, 1978). Precisamente, la revisión fotogeológica detallada del sector de la traza de falla ubicado al noreste de la Universidad Metropolitana (UNIMET), (sector Padrón de Santa Rosa) al este de Caracas, reveló la existencia de paleoescarpes cosísmicos deformando la base del escarpe de línea de falla de la traza El Ávila, ubicado por debajo del nivel de referencia morfoestratigráfica de la cota 1.200 msnm, bajo la forma de bermas tectónicas una de las cuales fue favorable para la excavación de un sitio de trinchera.

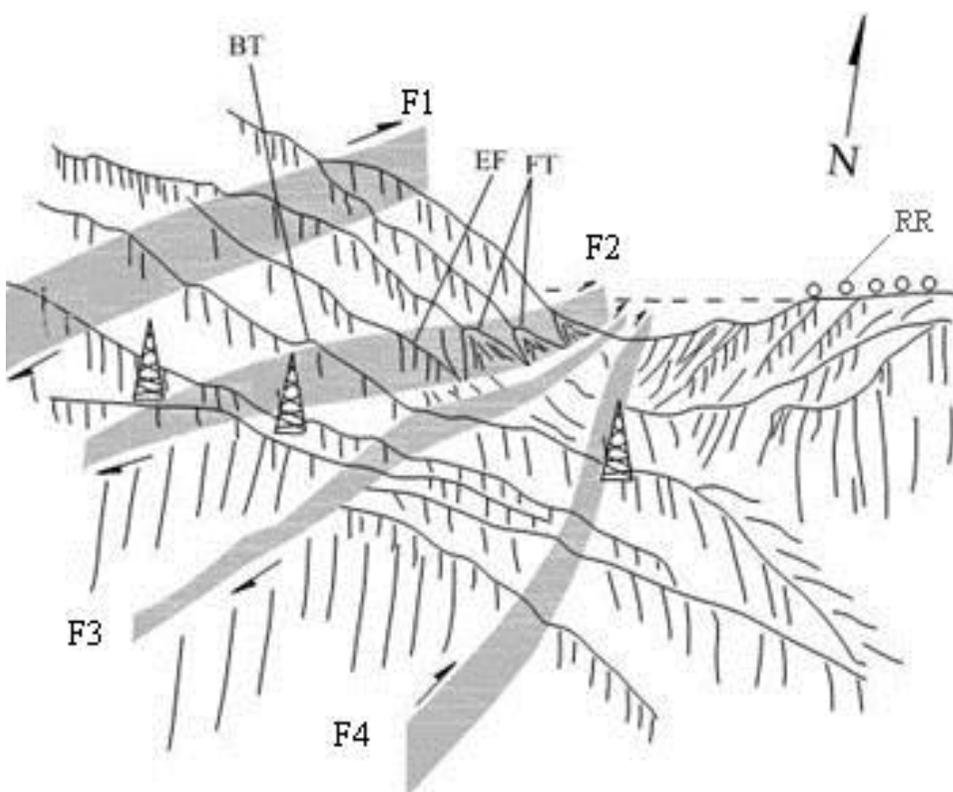


Figura 4. Trazas de fallas en échelon, en el sector La Culebrilla, con el detalle de las evidencias morfotectónicas de actividad reciente. En la falla F2 BT: berma tectónica, EF: escarpe de falla, FT: faceta triangular, RR: remanente de la superficie residual de cota 1.200 msnm.

Foto: Ollarves, 2007

3. Estudio paleosísmico de la trinchera de Santa Rosa

3.1 Materiales y métodos

La excavación de una trinchera de exploración paleosísmica en la falla El Ávila respondía a la necesidad de conocer la actividad reciente de esta falla, tomando en cuenta el vacío de información sísmológica tanto histórica, como instrumental que caracteriza a la misma, y la condición de este accidente estructural como falla de sitio en los estudios de amenaza sísmica para Caracas, ciudad capital, y sus infraestructuras de servicio. A tal efecto, la excavación de esta trinchera debía cumplir los siguientes objetivos: en primer lugar, documentar la actividad tectónica reciente de la falla, en particular durante el Holoceno; y en segundo lugar, proporcionar insumos de información sobre la historia de la actividad sísmica de la falla con base a dataciones radiocarbónicas de marcadores sedimentarios deformados.

3.1.1 Condiciones de sitio

Para cumplir con los objetivos señalados, se ubicó el sitio de trinchera paleosísmica en una de las bermas tectónicas, reconocidas en el sector Padrón, de la parte baja del topo Santa Rosa (Figura 5). En este sitio, las referidas bermas cortan los depósitos de ladera compuestos por deslaves adosados al pie del Ávila. De esta manera, existían buenas expectativas de hallar evidencias de deformaciones cosísmicas en los materiales de deslaves, en la vertical cortada por la trinchera de manera perpendicular al escarpe de falla. La trinchera se excavó con una orientación N-S, perpendicular a una de estas bermas, con las siguientes

dimensiones 3 m de profundidad por 1,5 m de ancho y 16 metros de largo. El levantamiento de la trinchera paleosísmica se realizó entre noviembre de 2008 y febrero de 2009, con el apoyo logístico de la Constructora Nolberto Odebrecht.

3.1.2 Levantamiento geológico de las paredes de la trinchera

Previamente al levantamiento se procedió a raspar y lavar con agua a presión ambas paredes de la trinchera, con el fin de diferenciar claramente las capas de sedimentos expuestos en la excavación; seguidamente se colocó un mallado de 1 m por 1 m para facilitar el levantamiento geológico de cada pared (Figura 6). De esta manera, se evidenció que los niveles de sedimentación más profundos se encontraban cortados por la traza activa de la falla El Ávila, pero no los tres últimos niveles más superficiales. La expresión de la falla en la excavación es la de un embudo abierto hacia la superficie y colmatado luego de cada evento sísmico por colapsos de materiales ricos en materia orgánica. En función de las interpretaciones preliminares, el muestreo se realizó con el objetivo de entender y conocer la cronología de los eventos ocurridos durante el Holoceno, no sólo la historia de la actividad sísmica de la falla, sino además, conocer la cronología de la secuencia estratigráfica de tres niveles sucesivos que sellan la misma. Dentro del embudo de falla, se tomaron 5 muestras en la pared este y 2 muestras en la pared oeste; en la secuencia estratigráfica que sella la falla momentáneamente, el muestreo se realizó en la base de cada uno de los tres niveles que componen la secuencia. El cuadro 1 presenta los resultados de las edades radiocarbónicas obtenidas y las

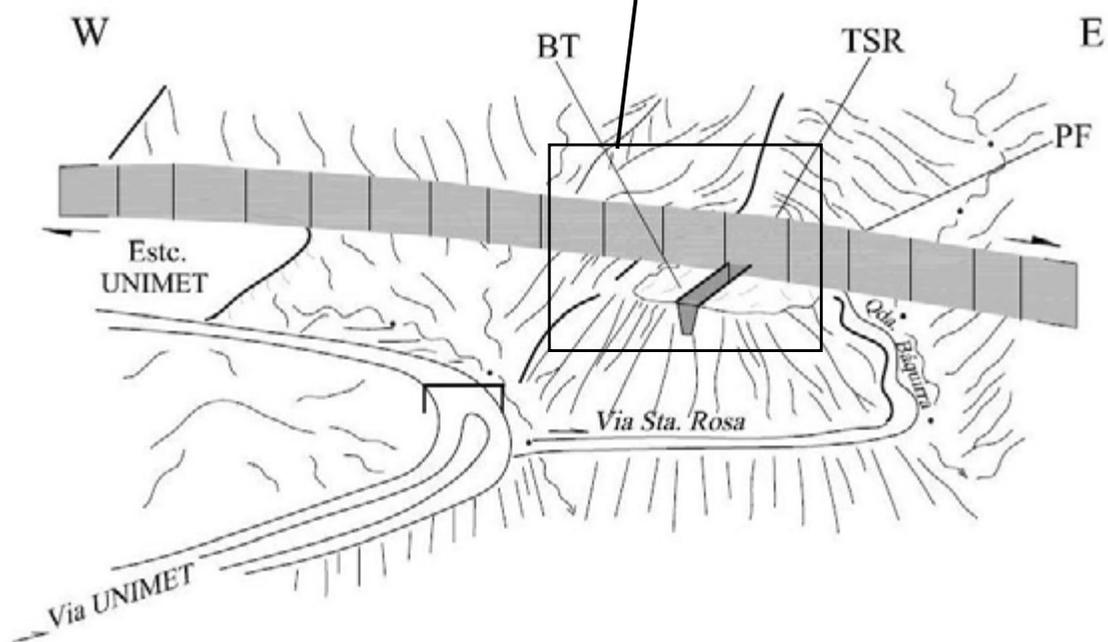


Figura 5. Ubicación del sitio de excavación paleosísmico en Santa Rosa. **BT:** berma tectónica, **PF:** plano de falla, **TSR:** trinchera paleosísmica, **UNIMET:** Estacionamiento Universidad Metropolitana.

Foto: Audemard, 2007



Figura 6. Limpieza de las paredes de la excavación, previo al levantamiento geológico de las mismas.

Foto: Rodríguez, 2008

figuras 7 y 8 el levantamiento geológico de ambas paredes con la ubicación de los sitios muestreados.

Cuadro 1. Listado de las muestras datadas por C¹⁴ (trinchera paleosísmica de Santa Rosa).

Fuente: elaboración propia

Referencia Muestra (Funvisis)	Referencia Beta analytic	Edad radiocarbónica convencional Edad AC (años)	Edad radiocarbónica con curva de calibración	Calibración año calendario		Calibración año calendario	
				2 sigma 95 %	1 sigma 68 %	2 sigma 95 %	1 sigma 68 %
				AC		AP	
VEN-01-08	244375	5700	4530 (AC) - 6480 (AP)	4670-4640 (AC) 4620-4460 (AC)	4560-4490	6620-6590 6570-6400	6500-6440
VEN-02-08	244376	2860	1010 (AC) - 2960 (AP)	1130-920 (AC)	1080-980 (AC)	3080-2870	3030-2930
VEN-03-08	244377	2700	830 (AC) - 2780 (AP)	920-800 (AC)	900-810 (AC)	2870-2750	2850-2760
VEN-04-08	244378	1630	420 (DC) - 1530 (AP)	340-540 (DC)	390-430 (DC)	1610-1410	1560-1520
VEN-05-08	244379	1370	660 (AC) - 1290 (AP)	610-690 (DC)	640-670 (DC)	1340-1260	1300-1280
VEN-06-08	244380	950	1040 (DC) - 910 (AP)	1010-1170 (DC)	1030-1160 (AD)	940-780	920-800
VEN-07-08	244381	340	1520 (DC) 430 (AP) 1590 (DC) 360 (AP) 1620 (DC) 330 (AP)	1450-1650 (DC)	1470-1640 (AP)	500-300	480-310
VEN-08-08	244382	910	1160 (DC) 800 (AP)	1030-1220 (DC)	1040-1170 (DC)	920-730	910-780
VEN-09-08	244383	500	1430 (DC) 520 (AP)	1400-1450 (DC)	1410-1440 (DC)	550-500	540-510 (AP)
VEN-10-08	244384	110	1700 (DC) 250 (AP) 1720 (DC) 230 (AP) 1820 (DC) 130 (AP) 1840 (DC) 110 (AP) 1880 (DC) 70 (AP) 1920 (DC) 40 (AP) 1950 (DC) 0 (AP)	1670-1780 (DC) 1800-1950 (DC) 1950-1960 (DC)	1680-1740 (DC)	280-170 (AP) 150-0 (AP) 0-0 (AP)	270-210 (AP) 140-20 (AP) 0-0 (AP)
VEN-11-08	244385	5080	3940 (AC) 5890 (AP) 3850 (AC) 5800 (AP) 3820 (AC) 5770 (AP)	3970-3780 (AC)	3960-3900 (AC) 3880-3800 (AC)	5920-5730	5900-5850 (AP) 5840-5750
VEN-12-08	244386	2430	510 (AC) 2460 (AP)	760-680 (AC) 670-400 (AC)	730-690 (AC) 540-410 (AC)	2710-2630 2620-2350	2680-2640 2500-2360
VEN-13-08	244387	4710	3510 (AC) 5460 (AP)	3630-3370 (AC)	3620-3590 (AC) 3530-3500 (AC) 3440-3380 (AC)	5580-5320	5570-5540 5480-5450 5390-5330
VEN-14-08	244488	7840	6650 (AC) 8600 (AP)	6810-6590 (AC)	6690-6630 (AC)	8760-8540	8640-8580
VEN-15-08	244489	1520	550 (DC) 1400 (AP)	430-620 (DC)	540-590 (DC)	1520-1330	1420-1360

AC= Antes de Cristo; AP= Antes del presente; DC= Después de Cristo; (*) = Análisis realizado en los laboratorios de Beta Analytic, INC, USA con el método AMS Estándar Delivery

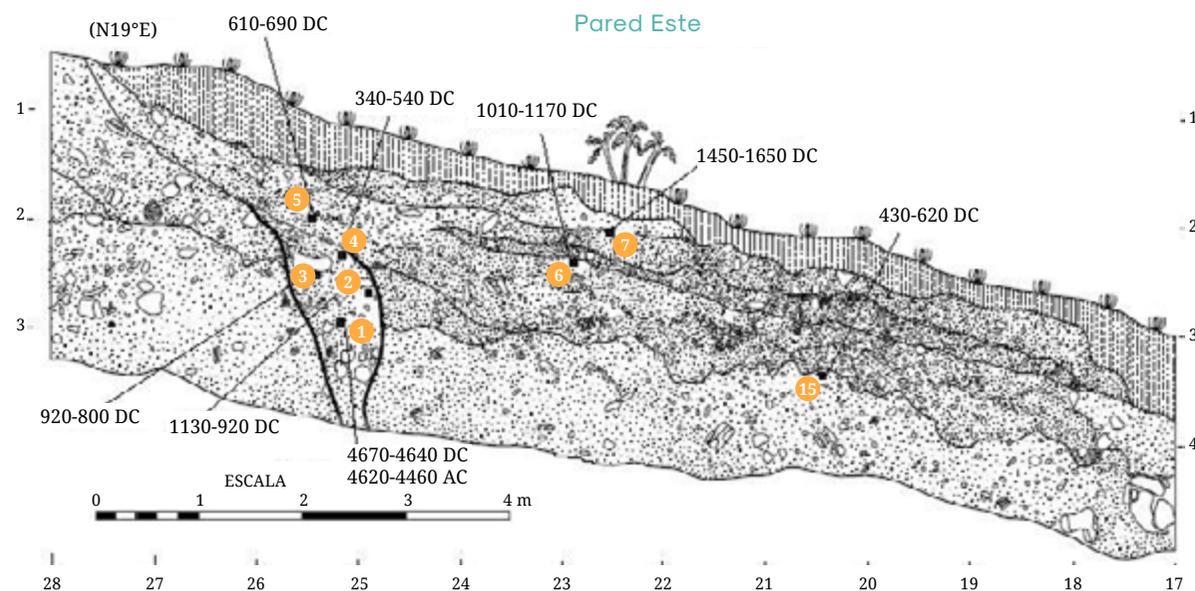


Figura 7. Estratigrafía de la pared este de la trinchera Santa Rosa y ubicación de los sitios de muestras datadas por C¹⁴.

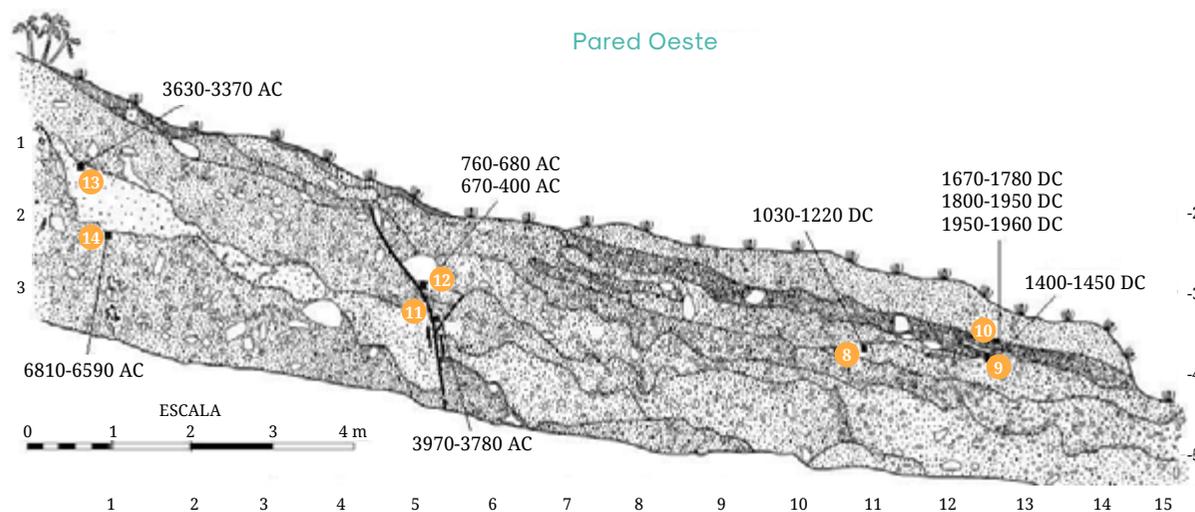


Figura 8. Estratigrafía de la pared oeste de la trinchera Santa Rosa, con la ubicación de los sitios de muestras datadas por C¹⁴, para facilitar su comparación con la pared este, esta pared es imagen especular de la original.

4. Resultados

El levantamiento geológico detallado de las dos paredes permitió, en primer lugar, evidenciar que la traza activa de la falla El Ávila corta los niveles de sedimentos más profundos, pero no afecta la secuencia estratigráfica de sedimentos más recientes (Figuras 9 y 10). En segundo lugar, se evidenció que los sedimentos que componen la secuencia estratigráfica fallada y no fallada, en su mayoría corresponden a materiales de ladera desordenados con características de deslaves de origen reciente, que contienen bloques aislados sub-angulares de tamaños variados, embebidos en una matriz arenosa con una importante fracción fina limo-arcillosa. El color de estos niveles estratigráficos varía desde

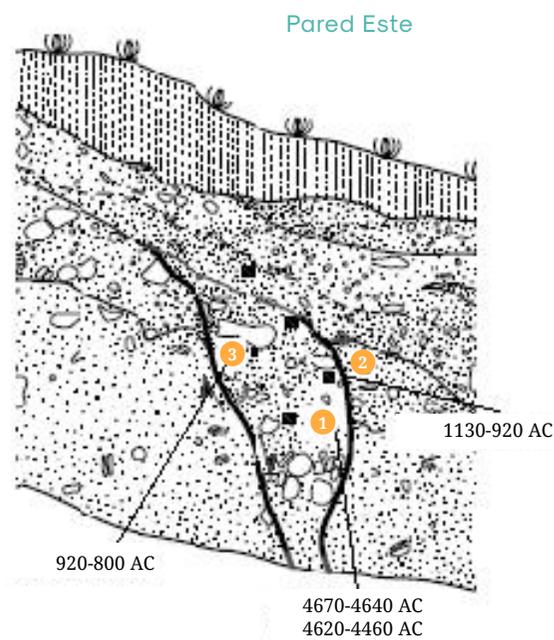


Figura 9. Ampliación del embudo de falla de la figura 7, con indicación de los niveles sedimentarios cortados por la falla sellada, y niveles sedimentarios recientes que sellan la falla.

un color rojo ladrillo claro principalmente en la secuencia fallada, hasta los niveles gris oscuro a gris claro coluvionados que siguen en dirección a la superficie y corresponden a la secuencia estratigráfica no fallada. Con el resultado de las dataciones se reconstituyó la actividad paleosísmica de la falla El Ávila y la actividad morfogenética de la secuencia estratigráfica que sella la misma.

4.1 Actividad paleosísmica

Una primera interpretación condujo a pensar que la falla tendía a tener periodos de recurrencia muy largos, presunción que pudo ser validada y corroborada con los resultados radiocarbónicos. Las muestras tomadas en la secuencia estratigráfica que

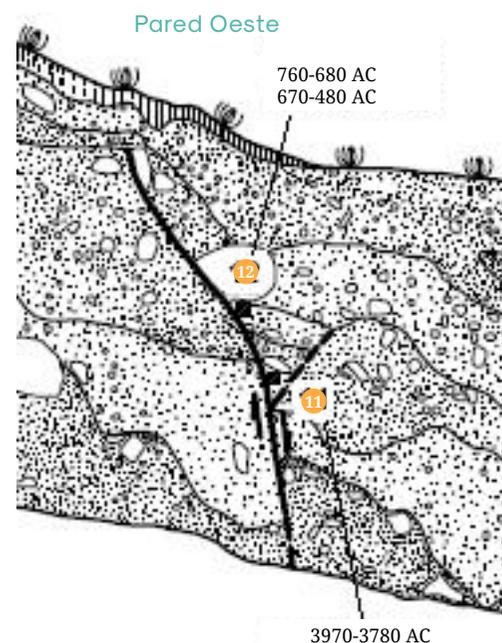


Figura 10. Detalle de la figura 8: los niveles sedimentarios más antiguos se encuentran cortados por la falla, mientras que los más recientes permanecen deformados.

sellan actualmente la falla, se depositaron entre los 400 años después de Cristo (DC) y la actualidad, mientras que las edades obtenidas de los sedimentos en el embudo de falla están en el orden de los 4.000 años y 700 años antes de Cristo (AC).

Del resultado obtenido en las dataciones (muestras 1, 2 y 3, de la pared este, y 11 y 12 pared oeste, Figuras 10 y 11), se estimó que el período de retorno de la traza activa de la falla El Ávila, se encuentra en el orden de los 3.200 a 3.500 años. En comparación con el valor inicialmente calculado por Audemard *et al.*, (2000), el periodo de retorno aumenta, y la velocidad de movimiento baja a razón de 0,3 mm/año. Para el cálculo del sismo máximo probable se utilizó la ecuación ($M = 3,98 + \log(RA)$) de Wells and Coppersmith, (1994), donde (RA) es el área en km^2 , la longitud para la falla El Ávila, está estimada en 50 km y la profundidad en 15 km, obteniéndose entonces una magnitud máxima probable de 6,9 Mw, difiriendo en una décima con el valor previamente estimado por Audemard *et al.*, (2000).

Han transcurrido aproximadamente 2.700 años, del último paleo-evento sísmico identificado bajo un sello de tres niveles estratigráficos, el cual arrojó una edad ^{14}C de 760 años–680 años AC, (muestra 12 de la pared oeste; Figura 11), aún faltan unos años para que esta falla nuevamente se active, pero es importante recordar que mientras más tiempo haya transcurrido del último evento, más cercano está el próximo.

4.2 Actividad morfogenética de la secuencia estratigráfica superior no fallada

La trinchera paleosísmica de Santa Rosa abrió una ventana en el conocimiento de la dinámica morfogenética que ha dominado el flanco montañoso sur del Ávila, particularmente en los últimos 2.000 años. El muestreo realizado en la base de cada uno de los niveles que componen la secuencia estratigráfica que sella la falla (Figuras 7 y 8), sugieren que cada 400 a 500 años en el flanco sur del Ávila, suceden eventos esporádicos de aludes torrenciales, como lo refiere Singer *et al.*, (2010).

La edad obtenida correspondiente al evento sello de deslaves más antiguos se obtuvo de la muestra de carbón N° 15 (Figura 7), tomada en la pared este, esta datación fecha el inicio de la secuencia no fallada, y la edad está entre los 430 años a 620 años DC. El segundo evento en orden cronológico arrojó una edad entre los 1.000 y 1.100 años DC, obtenido a partir de las muestras N° 6, pared este y N° 8, pared oeste. La datación más reciente obtenida en estos flujos torrenciales está alrededor de los 1.450 y 1.600 años DC (muestra N°7 pared este, y muestra N° 9 pared oeste). El diferencial de tiempo entre cada evento oscila entre 400 y años 500, entonces, pareciera ser que estamos en la ventana de tiempo de ocurrencia de este tipo de eventos. Para un mejor entendimiento se ha tomado el levantamiento geológico de la pared este (Figura 11), donde se expone la correlación cronoestratigráfica de los paleoeventos datados.

Las evidencias encontradas en la excavación paleosísmica conforman un registro

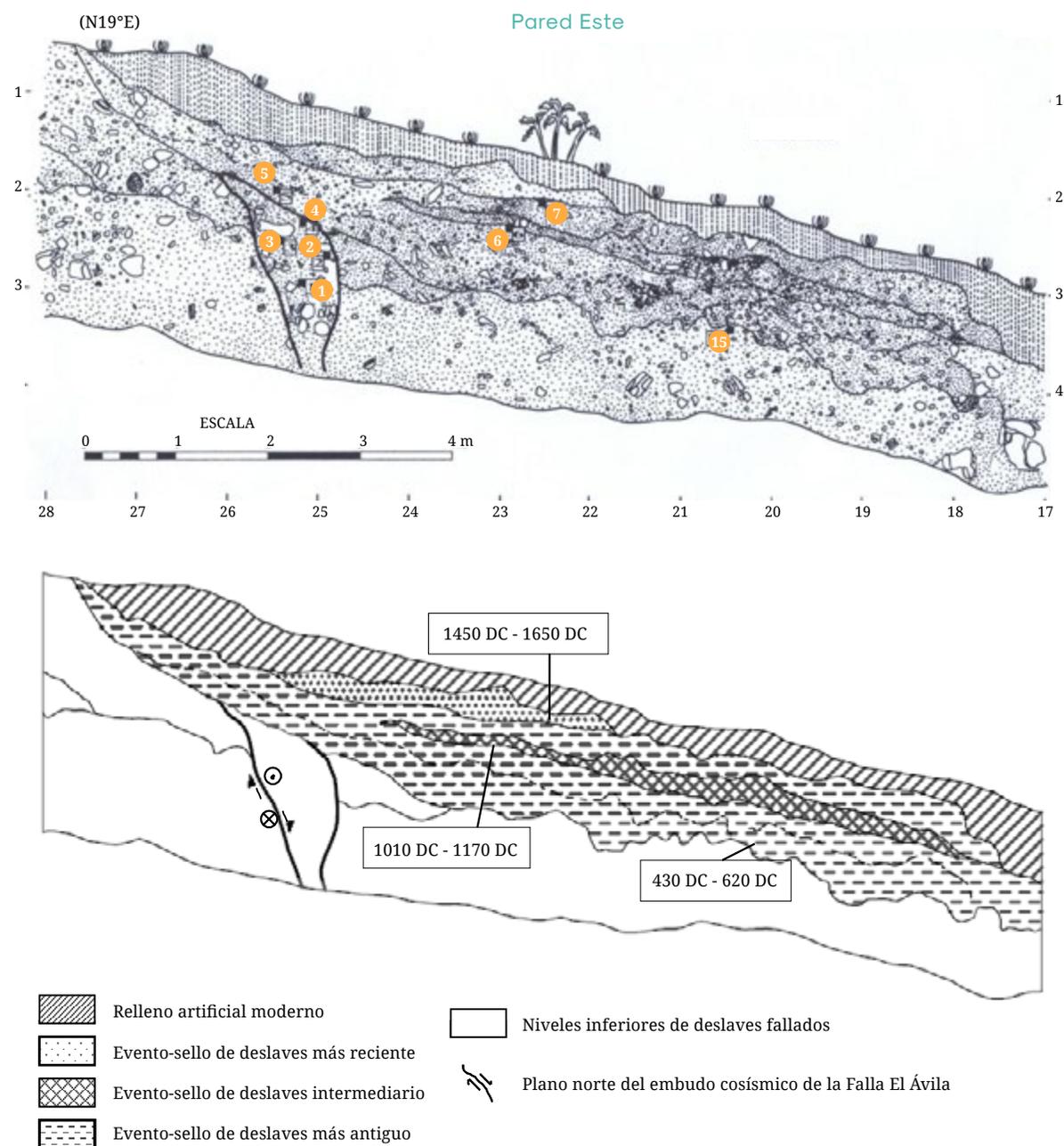


Figura 11. Datación cronoestratigráfica de los paleoeventos de origen torrencial y calibración de los mismos, por medio de los resultados radiocarbónicos en la secuencia estratigráfica que sella la falla.

Fuente: Singer *et al.*, 2010

palpable que nos recuerda que este tipo de eventos, probablemente de características parecidas a lo sucedido en el estado Vargas en 1999, ha ocurrido y ocurrirá en el flanco sur de la serranía, donde el valle de Caracas se comportaría como el almacén de los flujos torrenciales provenientes de las laderas del Ávila.

5. Conclusiones

El estudio paleosísmico de la trinchera Santa Rosa confirmó la actividad reciente de la falla El Ávila, accidente perteneciente al sistema Tacagua-El Ávila. En la excavación quedó expuesta la traza activa cortando sedimentos cuaternarios. Los parámetros de esta falla estimados inicialmente por Audemard *et al.*, (2000) fueron: velocidad de 0,4 mm/año y un período de retorno de 2.500 años y la magnitud del sismo máximo probable se tenía en 6,8 Mw. Del presente estudio se obtuvo una velocidad de 0,3 mm/año, y un periodo de retorno en el orden de los 3.200-3.500 años, significando que el nivel de amenaza es menor al previamente estimado, y la magnitud del sismo máximo probable es de 6,9 Mw. Han transcurrido aproximadamente 2.700 años del último evento sísmico datado, aún faltan algunos siglos, para entrar en la ventana de tiempo, del período de retorno estimado.

En la trinchera paleosísmica, además de conocer la historia cronológica de la falla, particularmente durante el Holoceno, se conoció la edad relativa de eventos esporádicos de flujos torrenciales ocurridos en los últimos 2.000 años de registros grabados en el tiempo, que han dejado su huella y que de forma momentánea han sellado la falla. El período de retorno de estos eventos, cuyos sedimentos reposan sobre los niveles fallados, se encuentran en el orden de los 400 a 500 años, el más reciente datado responde a una edad entre 1.450 y 1.600 DC, lo que indica que el próximo evento de este tipo se encuentra en la ventana de tiempo de ocurrencia.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la dibujante Marina Peña, por su apoyo en los dibujos presentados en esta investigación, al grupo de trabajo que apoyó el levantamiento de las paredes de la trinchera (Carlos Reinoza, Richard Montenegro, Johana Ojeda, Iliana Aguilar y Maxlimer Vallée); a Franco Urbani, por sus observaciones y sugerencias al trabajo, así como a los revisores anónimos, por su revisión y sugerencias que ayudaron a mejorar la presente contribución. A la Compañía ODEBRECHT, por su apoyo en la logística de la excavación paleosísmica en el sector Padrón, parte alta de Santa Rosa.

7. Referencias citadas

- ACOSTA, L. 1997. Estudio de la traza activa de la falla de Tacagua-El Ávila para fines de microzonificación sísmica del corredor estratégico Caracas-Litoral norte-central de Venezuela. *Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano*. Tomo I: 21-27.
- AGUERREVERE, S. & G. ZULOAGA. 1937. *Geological notes on the central part of the Cordillera de la Costa*. Ministerio de Fomento. Caracas, Venezuela.
- AUDEMARD, F. A. 1993. Trench investigation across the Oca-Ancon fault system, Northwestern Venezuela. *Second International Symposium on Andean Geodynamics*. pp. 51-54. Oxford-England. (Extended abstract).
- AUDEMARD, F. A. 1996. "Paleosismicity studies on the Oca-Ancon fault system, northwestern Venezuela". *Tectonophysics*, 259: 67-80.
- 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. 2003. "Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas". *Revista Geográfica Venezolana*, 44(1), 11-46.
- AUDEMARD, F. A. 2005. "Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations and perspectives". *Tectonophysics*, 408: 29-61.
- AUDEMARD, F. A.; MACHETTE, M.; COX, J.; DART, R. & H. HALLER. 2000. *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Venezuela and its Offshore Regions*. USGS Open-File report 00-0018 (accessible from USGS web page; open file reports ofr-00-0018).
- BLOOM, A. L. 1978. *Geomorphology*. Prentice Hall, New Jersey.
- COTTON, C. A. 1950. "Tectonic scarps and fault valleys". *Geol. Soc. American Bull.*, 81: 717-758.
- DENGO, G. 1951. "Mapa geológico de la región de Caracas, escala 1:50.000". *Boletín Geológico*, 1(1): 39-115. Versión en inglés: 1953. "Geology of the Caracas region, Venezuela". *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 64(1): 7-40.
- FANTI, O.; FRONTADO, L. y A. VECCHIO. 1980. *Tectónica y sismicidad del área de Caracas y sus alrededores*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Caracas-Venezuela. Trabajo Especial de Grado (Inédito).
- FUNVISIS. 1983. *Evaluación del riesgo sísmico para el proyecto ferrocarril Caracas-Litoral*. 2 volúmenes. (Inédito). Caracas, Venezuela.
- GARRITY, C.; HACKLEY, P. y F. URBANI. 2004. *Digital Shaded-Relief Map of Venezuela*. US Geological Survey, Open File Report 2004-1322. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1322>
- OLLARVES, R.; SINGER, A. y F. A. AUDEMARD. 2007. *Neotectónica de la falla Tacagua-El Ávila, en el marco del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*. (Inédito). Caracas, Venezuela.

- RIAL, J. 1973. "La fosa tectónica de Tacagua y su relación con la sismicidad de la región de Caracas". *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, 8(3): 49-54.
- SINGER, A. 1974. "Acumulaciones holocenas torrenciales catastróficas, de posible origen sísmico, y movimientos neotectónicos de subsidencia en la parte oriental del Valle de Caracas". *Geos*, 22: 64-65.
- SINGER, A. 1977a. Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas. *Seminario de Riesgo Geológico*. OEA/FUNVISIS/UCV. Caracas, Venezuela.
- SINGER, A. 1977b. Síntesis regional de la evolución geomorfológica de la Cordillera de la Costa en el área de Caracas. *V Congreso Geológico Venezolano*. Caracas, Venezuela (noviembre).
- SINGER, A. y F. A. AUDEMARD. 1997. Aportes de FUNVISIS al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología. En: J. GRASES (ed.). *Diseño Sísmorresistente: Especificaciones y Criterios Empleados en Venezuela*. pp. 25-38. vol. XXXIII. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas, Venezuela.
- SINGER, A.; ZAMBRANO, A.; OROPEZA, J. y M. TAGLIAFERRO. 2007. Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del valle de Caracas a escala 1:25.000. *IX Congreso Geológico Venezolano*, (CD). Caracas, Venezuela.
- SINGER, A.; RODRÍGUEZ, L.; AUDEMARD, F., y R. OLLARVES. 2010. Estimación del periodo de retorno de manifestaciones de aludes torrenciales en la serranía del litoral por medio de dataciones C¹⁴ obtenidas en trinchera al pie del Ávila y por vía arqueológica en las formaciones aluviales de Caracas. En: J. L. LÓPEZ (ed). *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas*. pp. 115-126. Editorial Gráficas Lauki. Caracas, Venezuela.
- SUÁREZ, G. y J. NÁBELEK. 1990. "The 1967 Caracas earthquake; fault. geometry, direction of rupture propagation and seismotectonic implications". *Jour. Geoph. Res.*, 95: 17.459-17.474.
- URBANI, F. y J. A. RODRÍGUEZ. 2004. *Atlas geológico de la cordillera de la Costa*. Caracas. Edic. Fund. Geos y Funvisis, 146 hojas a escala 1:50.000.
- WEISBORD, N. L. 1957. "Notes on the geology of the Cabo Blanco area, Venezuela". *Bull. Amer. Paleont.*, 38(165): 25.
- WEHRMANN, M. 1972. "Geología de la región de Caracas-Colonia Tovar". *Boletín de Geología*, Publicación especial (5,4): 2.093-2.121.
- WELLS, D. & K. COPPERSMITH. 1994. "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement". *Bulletin of Seismological Society of America*, 84(4): 974-1.002.

Fecha de culminación del artículo
(con correcciones): julio, 2015
Lugar: Caracas, Venezuela