

LOS SISTEMAS DE FALLA AGUA CALIENTE Y RÍO AZUL Y RELEVOS COMPRESIVOS ASOCIADOS, VALLE CENTRAL DE COSTA RICA

Walter Montero^{1*}, Marco Barahona¹, Wilfredo Rojas² & Magda Taylor²

¹Escuela Centroamericana de Geología
Universidad de Costa Rica, apdo. 1214-2060 UCR, San José, Costa Rica

²Red Sismológica Nacional (ICE-UCR)

*Autor para contacto: wmontero@geologia.ucr.ac.cr

(Recibido 05/04/06; aceptado 03/11/06)

ABSTRACT: Two seismic sources have been studied in the central region of Costa Rica. The first one is located south and west of San José and it has been the most active one in past and recent times. The joint analysis of the recent faulting, the seismicity and the seismotectonic information define the Agua Caliente fault system. It includes the east-west sinistral Agua Caliente fault and to the west a northwest contractional relay zone, comprising the reverse and west dipping Patalillo, Aserrí, Belo Horizonte and Escazú faults. An analysis of the historical seismicity shows that along the Agua Caliente fault system occurred ruptures in March 21, 1842, April 10, 1910 (two ruptures) and May 4, 1910 (Ms 6.1). The earthquakes occurred in June 10, 1835 (probable) and December, 22, 1990 (Ms 5.7) might also be associated with the Agua Caliente fault system if it continues to the west, reaching the Virilla fault. The second seismic source studied is related with a sequence of earthquakes (coda magnitudes Mc between 2.4 to 4.0), occurred between December 2000 and August 2001, under the central and eastern sectors of the city of San José. These earthquakes showed a north-northwest epicentral distribution and predominant depths ranging between 5 and 11 km. A transverse seismic profile suggests a fault surface dipping east-northeast. For the two largest events of the sequence, occurred on January 20, 2001 (Mc 4.0 and 3.6), reverse focal mechanisms with nodal planes trending NNW - NNE were determined. The seismicity occurred during the last 25 years shows a similar spatial distribution. These earthquakes are occurring along a blind reverse fault with the eastern sector been uplifted. This fault is the western part of the Cipreses thrust and fold system located east of San José, and bounded in the south by the Río Azul fault.

Key words: Morphotectonics, neotectonics, historical seismicity, seismotectonics, Valle Central of Costa Rica.

RESUMEN: Se han investigado dos zonas sísmicas en la región central de Costa Rica. La primera se localiza del lado oeste y sur de San José y es la que ha mostrado mayor actividad sísmica en tiempos históricos y recientes. El análisis conjunto del fallamiento reciente, la sismicidad y la sismotectónica permiten determinar que ésta se relaciona con el sistema de falla Agua Caliente, el cual incluye la falla sinistral Agua Caliente de rumbo cercano al E-W, la cual se continúa al oeste con un relevo compresivo de rumbo noroeste, que incorpora

las fallas inversas, buzantes al oeste, Patalillo, Aserri, Belo Horizonte y Escazú. Un análisis de la sismicidad histórica muestra que a lo largo del sistema de falla Agua Caliente han ocurrido las rupturas del 21 de marzo de 1842, 13 de abril de 1910 (dos rupturas a las 06:37 y a las 07:05 GMT) y del 4 de mayo de 1910 (Ms 6,1). Si el sistema de falla Agua Caliente se continua al oeste hasta alcanzar la falla Virilla, también se pueden asociar las rupturas del 10 de junio de 1835 (probable) y la del 22 de diciembre de 1990 (Ms 5,7). La segunda zona sísmica estudiada se relaciona con una secuencia de sismos, con magnitudes coda (Mc) entre 2,4 y 4,0, ocurridos entre diciembre del 2000 y agosto del 2001 y distribuidos entre el centro y el oriente de San José. Sus localizaciones muestran una distribución epicentral alargada en dirección NNW y profundidades predominantes entre 5 y 11 km. Un perfil transversal a la faja sugiere una superficie de falla inclinada al ENE. Los mecanismos focales determinados para los dos sismos de mayor magnitud de la secuencia, ocurridos el 30 de enero del 2001 (magnitudes Mc 4,0 y 3,6), son de falla inversa y tienen rumbos entre NNW y NNE. La sismicidad ocurrida durante los últimos 25 años muestra una faja de temblores con una distribución espacial similar a la anterior. Se interpreta que los temblores se originaron en una falla inversa ciega, que tiene su lado ascendente del lado este y que es la parte oeste de una serie de fallas inversas ciegas y pliegues denominado Cipreses, el cual está limitado al sur por la falla Río Azul.

Palabras clave: Morfotectónica, neotectónica, sismicidad histórica, sismotectónica, Valle Central de Costa Rica..

INTRODUCCIÓN

En la región central de Costa Rica se localiza un sistema de fallamiento y plegamiento activo, denominado el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, el cual define el límite oeste entre el bloque Panamá y la placa Caribe (Marshall et al., 2000; Montero, 2001; ver recuadro en figura 1a). El Valle Central, un valle intermontano ubicado entre las cordilleras de Talamanca y volcánica Central, está atravesado por el anterior cinturón de fallas y pliegues. En el mismo se localiza la Gran Área Metropolitana, la principal zona urbana del país y que incluye entre otras a las ciudades de San José, Cartago, Alajuela y Heredia.

A partir de diciembre del año 2000 se inició una actividad de pequeños temblores que se ubicaron bajo el sector este de la ciudad de San José. Esta sismicidad tuvo su pico de actividad el 30 de enero del 2001, cuando ocurrieron los dos sismos de mayor magnitud de la secuencia. La actividad continuó hasta septiembre con pequeños temblores. Esta sismicidad sugiere la presencia de una falla activa bajo la zona urbana de San José, con un potencial sísmico que requiere ser evaluado, considerando la alta densidad poblacional y la importancia económica de la zona.

En esta investigación se determina la distribución espacial y temporal de la sismicidad superficial ocurrida en la zona este de San José entre diciembre del 2000 y agosto del 2001 y se realizan los mecanismos focales para los dos principales eventos de esa secuencia sísmica. Paralelamente,

se revisa y reinterpreta el fallamiento activo en la zona cercana a San José y se realizan nuevos mecanismos focales, lo cual junto con la información disponible sobre la sismicidad y la sismotectónica, permiten identificar dos relevos compresivos asociados con las fallas de desplazamiento sinistral Agua Caliente y Río Azul. Finalmente, se revisaron los terremotos históricos ocurridos en los dos últimos siglos, lo cual permite aproximar los segmentos de falla donde han ocurrido rupturas históricas. Asimismo, se sugieren las zonas que no han tenido rupturas, las cuales podrían representar la mayor amenaza sísmica a lo largo del sector sur del valle Central.

DATOS Y MÉTODOS USADOS

La actividad sísmica ocurrida en el este de San José fue inicialmente localizada por el personal de la Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR) en su sede de la Escuela Centroamericana de Geología. Posteriormente, cada evento fue releído en sus fases P y S y fueron re-localizados usando el programa de localización de sismos del paquete computacional SEISAN (Havskov & Ottomöller, 2000). El modelo de corteza de capas planas usado se muestra en el Cuadro 1, el cual es una modificación del definido por Matumoto et al. (1977) para el noroeste de Costa Rica.

La magnitud coda (Mc) se estimó a partir de la duración de la coda (D), la cual se leyó

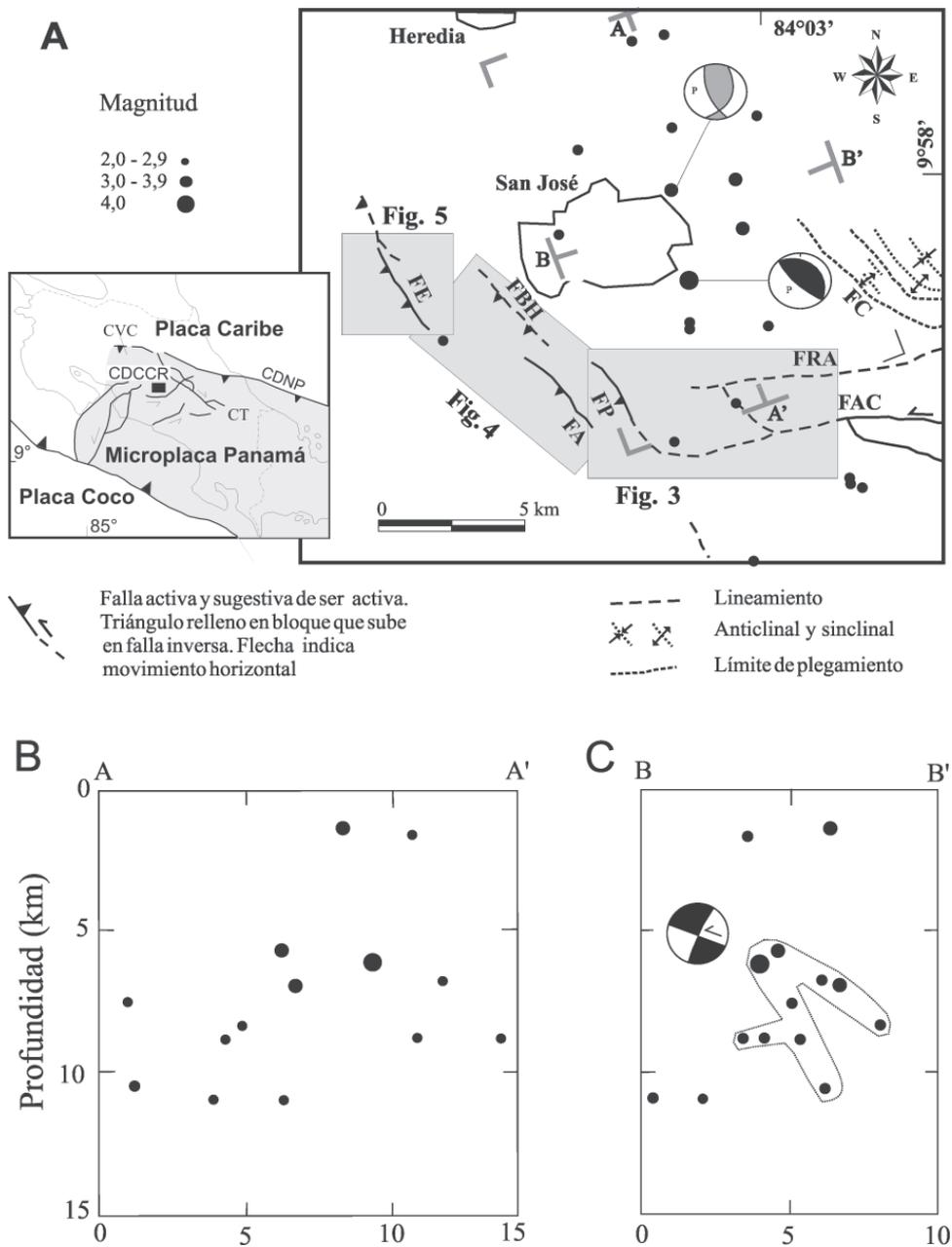


Fig. 1A: Mapa de epicentros de los temblores ocurridos entre diciembre del 2000 y agosto del 2001 se muestra junto con las fallas y los mecanismos focales de los eventos del 30 de enero del 2001, a las 04: 31 GMT (Mc 4,0) y a las 23: 05 (Mc 3,6) (eventos 12 y 13 en figura 2 y Cuadro 2). Se muestra las líneas de perfiles de profundidad paralelo AA' y perpendicular BB' a la sismicidad. Los nombres FE, FBH, FA, FP, FRA, FAC y FC son respectivamente las fallas Escasú, Belo Horizonte, Aserrí, Patalillo, Río Azul, Agua Caliente y Cipreses. Asimismo, se indican la ubicación de las figuras 3, 4 y 5. En el recuadro se muestra el marco tectónico, donde CDCCR es el Centro Deformado del Centro de Costa Rica y CDNP es el Cinturón Deformado del Norte de Panamá. CT y CVC son respectivamente las cordilleras de Talamanca y volcánica Central. B: Perfil paralelo al lineamiento sísmico AA' muestra que los temblores tuvieron profundidades predominantes entre 5 y 11 km. C: Perfil perpendicular a la sismicidad sugiere que los temblores están ocurriendo en una falla inclinada al E (ver zona con línea encerrada en puntos). Se muestra un corte del mecanismo focal 12.

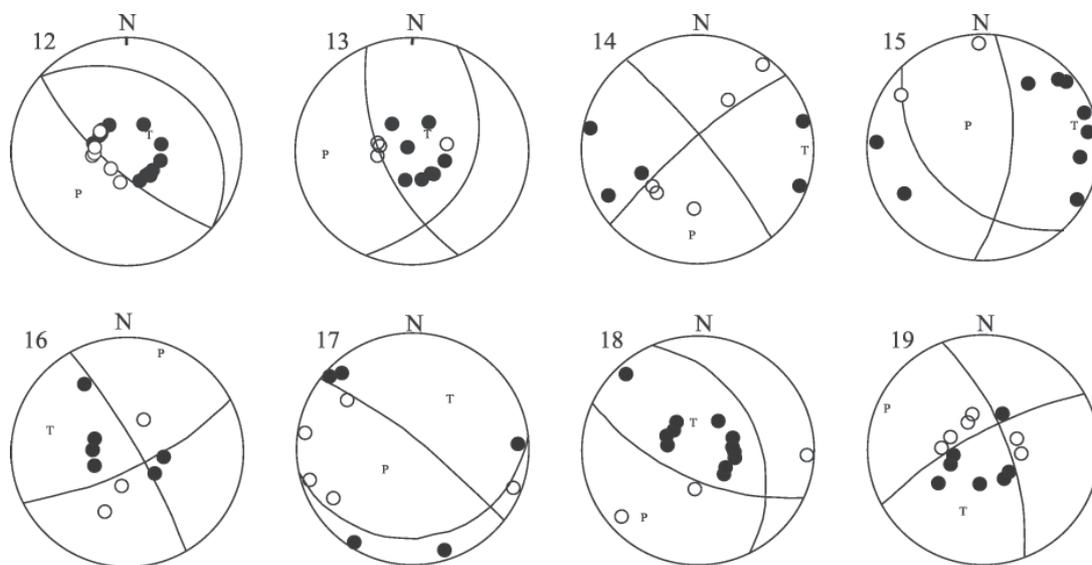


Fig. 2: Mecanismos focales 12 a 19 realizados para este estudio. Las soluciones se proyectan en el hemisferio focal inferior. Los círculos rellenos corresponden con compresiones y los sin rellenar son dilataciones. P y T muestran la ubicación de los ejes de presión y de tensión.

en las diversas estaciones de la RSN, en las cuales existía una buena relación señal/ruido. La fórmula usada para el cálculo de la magnitud coda es:

$$M_c = -1,21 + 2,38 * \log D + 0,0012 \Delta \quad (1)$$

Donde Δ es la distancia hipocentral en kilómetros y D se mide en segundos. En el estudio se revisó la actividad sísmica histórica y se incorporó en el análisis los sismos ocurridos entre los años 1984 y 2005. Asimismo, se

realizaron mecanismos focales tanto para los dos sismos de mayor magnitud de la secuencia del este de San José, así como para los sismos con un número igual o superior a 9 polaridades de onda P, ocurridos entre septiembre del 2001 y el 2005, en los alrededores de San José (eventos 12 a 19 en Cuadro 2). Para las inversiones focales se utilizó el programa FOCMEC del paquete computacional SEISAN (Havskov & Ottomöller, 2000).

Los mecanismos focales se dividen en las clases de calidad A y B de acuerdo con los siguientes

Cuadro 1

Modelo de corteza

No Capa	Velocidad (km/s)	Espesor (km)	Profundidad inicial (km)
1	3,5	0 – 07,2	0
2	6,2	08,8	07,2
3	6,6	25,0	16,0
4	7,9	39,0	41,0
5	8,0	indefinido	80,0

criterios. Los de calidad A son aquellos que tienen un solo tipo de solución y ambos planos nodales bien restringidos (< de 10° de variación en rumbo e inclinación). Los de calidad B son aquellos donde uno de los planos nodales tiene un intervalo de variación amplio en rumbo e inclinación (entre 10° y 30°).

La investigación incluyó el análisis de trabajos previos efectuados en la zona de estudio sobre el fallamiento activo y la sismotectónica y además se realizó un nuevo análisis de las fotos aéreas de la zona de San José y alrededores, con el objetivo de reevaluar los lineamientos o fallas con posible actividad reciente, usando criterios de geomorfología tectónica. Este último estudio

se complementó con nueva información morfo-tectónica y geológica obtenida en el campo.

DESCRIPCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SISMICIDAD DEL ESTE DE SAN JOSÉ

El 9 de diciembre del 2000 se inició un enjambre sísmico bajo el sector este de San José, cuando se localizaron tres eventos, siendo el principal de magnitud 3,1. Un nuevo sismo ocurrió el 16 del mismo mes (Mc 2,4). En enero la actividad continuó con cinco sismos, registrándose los dos eventos de mayor magnitud de

Cuadro 2

Parámetros focales de los temblores con mecanismos focales

No	Fecha	TO	Lat. Long.	Prof. km	Mc	Mecanismo focal			C.	Referencias
						R.	I.	D.		
1	1992 11 03	146	9,921 4,138	6,5	4,1	052	56	78	A	FE, F & M
2	1992 11 03	1151	9,917 84,129	11,3	3,0	058	80	80	B	FE
3	1992 11 03	1226	9,927 84,125	11,1	3,3	082	75	80	A	FE, F & P
4	1992 11 03	2117	9,978 84,174	5,2	2,8	002	46	-54	A	FE, F & P
5	1992 12 23	1139	9,912 84,129	12,0	2,6	273	42	67	B	FE
6	1993 01 08	1018	9,973 84,197	12,8	3,2	063	32	71	A	FE, F & P
7	1993 01 08	1101	9,980 84,200	14,4	3,1	330	90	46	A	FE, F & P
8	1993 01 20	0416	9,979 84,183	11,6	3,7	230	90	45	A	FE, F & P
9	1993 01 30	1831	9,971 84,092	16,2	3,4	121	80	-85	B	FE
10	1993 02 13	0701	9,963 84,187	17,9	3,1	072	77	59	B	FE
11	1994 10 29	0537	9,867 84,064	6,6	3,3	253	84	-40	A	FE, F & M
12	2001 01 01	0431	9,920 84,070	5,9	4,0	135	70	90	A	Este estudio
13	2001 01 01	2305	9,941 84,059	6,9	3,6	159	62	67	B	Este estudio
14	2002 05 25	0959	9,901 84,126	2,0	3,1	229	79	-10	B	Este estudio
15	2002 05 27	0528	9,863 84,126	9,7	3,0	359	48	-48	B	Este estudio
16	2002 06 22	1225	9,865 84,083	6,9	2,9	063	73	10	A	Este estudio
17	2004 03 24	2122	9,867 84,139	8,2	4,0	309	80	-80	A	Este estudio
18	2004 04 04	1051	9,888 84,099	11,2	3,7	114	62	67	B	Este estudio
19	2005 01 10	1233	9,886 84,112	9,3	4,2	339	66	18	A	Este estudio

No. es el número de mecanismo focal en la figura 6a; TO es el tiempo origen en GMT; Lat. y Long. son respectivamente la latitud y longitud del epicentro; Prof. es la profundidad del sismo; M. es la magnitud R. es el rumbo, I. la inclinación y D. el deslizamiento de un plano nodal. C. es calidad. En las referencias, FE es Fernández (1995), F & P es Fernández & Pacheco (1998) y F & M es Fernández & Montero (2002).

la secuencia, el día 30 de enero a las 04: 31 GMT (Mc 4,0) y a las 23: 05 (Mc 3,6). La actividad continuó en los siguientes meses hasta setiembre cuando se registraron los dos últimos temblores de la secuencia. La actividad sísmica estudiada consistió de 23 temblores ocurridos entre diciembre y agosto, con un promedio de 2,5 eventos por mes y variando entre un mínimo de un evento por mes hasta un máximo de cinco sismos por mes. Las magnitudes variaron entre 1,4 y 4,0 Mc (Fig. 1). La secuencia se puede considerar como un pequeño enjambre sísmico alargado en el tiempo, que no alcanzó a provocar alarma entre la población. Sin embargo, esta secuencia sísmica en cuanto a número de eventos y liberación de energía, ha sido la más importante ocurrida en esta zona urbana de San José, desde que se instaló en 1973 la red de estaciones sismológicas de la Universidad de Costa Rica en los alrededores del Valle Central, y su estación central de la ciudad universitaria (SJS). Desde la instalación de esta última estación se habían detectado varios sismos en la misma zona, pero estos habían ocurrido como eventos aislados y no en forma de secuencia como fue la previamente descrita.

Los epicentros de los sismos muestran una mayor concentración hacia la zona este de San José, teniendo una forma alargada en sentido noroeste y distribuidos entre el este de Heredia y el sur de San José (Fig. 1a). Es muy posible, que esta sismicidad tenga una mayor concentración espacial y que la dispersión de los sismos se deba a que cada temblor se relocalizó independientemente uno de otro.

Para determinar los sismos incorporados en los perfiles de profundidad, se observó la relación entre las fallas y los epicentros. Se decidió incluir en los perfiles únicamente los temblores localizados del lado norte de la falla Agua Caliente y los ubicados al este del lado central de San José. Las profundidades de los temblores relocalizados son entre 1 y 11 km, con una clara concentración entre los 5 y 10 km de profundidad (Fig. 1b y 1c). El perfil transversal de la sismicidad sugiere una superficie de falla inclinada al ENE, con un ángulo entre 20° y 40° (Fig. 1c).

Con respecto a los mecanismos focales, estos se realizaron para los temblores de magnitudes mayores a 3,0. Sin embargo, solo se

obtuvieron soluciones focales de calidad A o B para los eventos del 30 de enero. Para el sismo de las 04:31 GMT (Mc 4,0), se leyeron 20 polaridades siendo 2 inconsistentes con el mecanismo escogido. Se encontró una solución de falla inversa bastante pura, donde el plano nodal de bajo ángulo se inclina al NE y el de alto ángulo se inclina al SW (evento 12 en figura 2; ver Cuadro 2). La solución focal tiene el plano de alto ángulo bien restringido, mientras que el de bajo ángulo está poco restringido. El eje de presión tiene una posición subhorizontal y se inclina al SW. Con respecto al sismo de las 23:05 GMT (Mc 3,6), la solución focal con base en 14 polaridades es ambigua, dado que admite dos soluciones diferentes con un mínimo de dos inconsistencias cada una (evento 13 en figura 2). Una posible solución es de desplazamiento de rumbo con planos nodales NE (dextral) y NW (sinistral). La otra es de falla inversa con planos de rumbo cercano al N, siendo el de bajo ángulo de inclinación al ESE. Considerando que la solución focal del evento de mayor magnitud de la secuencia es de falla inversa, y dado que la distribución epicentral y en profundidad de la sismicidad sugiere una falla inclinada al E, se escogió el mecanismo de falla inversa para el evento de las 23:05 GMT.

EL SISMO DEL 12 DE JULIO DE 1933

La actividad sísmica histórica en la ciudad de San José y alrededores, muestra que desde la época de la Colonia y en especial durante los últimos 200 años, que es el período para el cual se cuenta con una mejor información sismológica, no ha ocurrido ningún sismo destructivo en San José, que se pueda relacionar con un sistema de fallamiento que se ubique dentro de su zona urbana. Durante este tiempo los temblores superficiales más importantes ocurridos cerca de esta ciudad, fueron las secuencias sísmicas de 1841 y 1910, los cuales se han asociado con fallas que se ubicarían fuera de la zona urbana de San José.

El único sismo histórico sospechoso que puede relacionarse con una falla bajo la ciudad

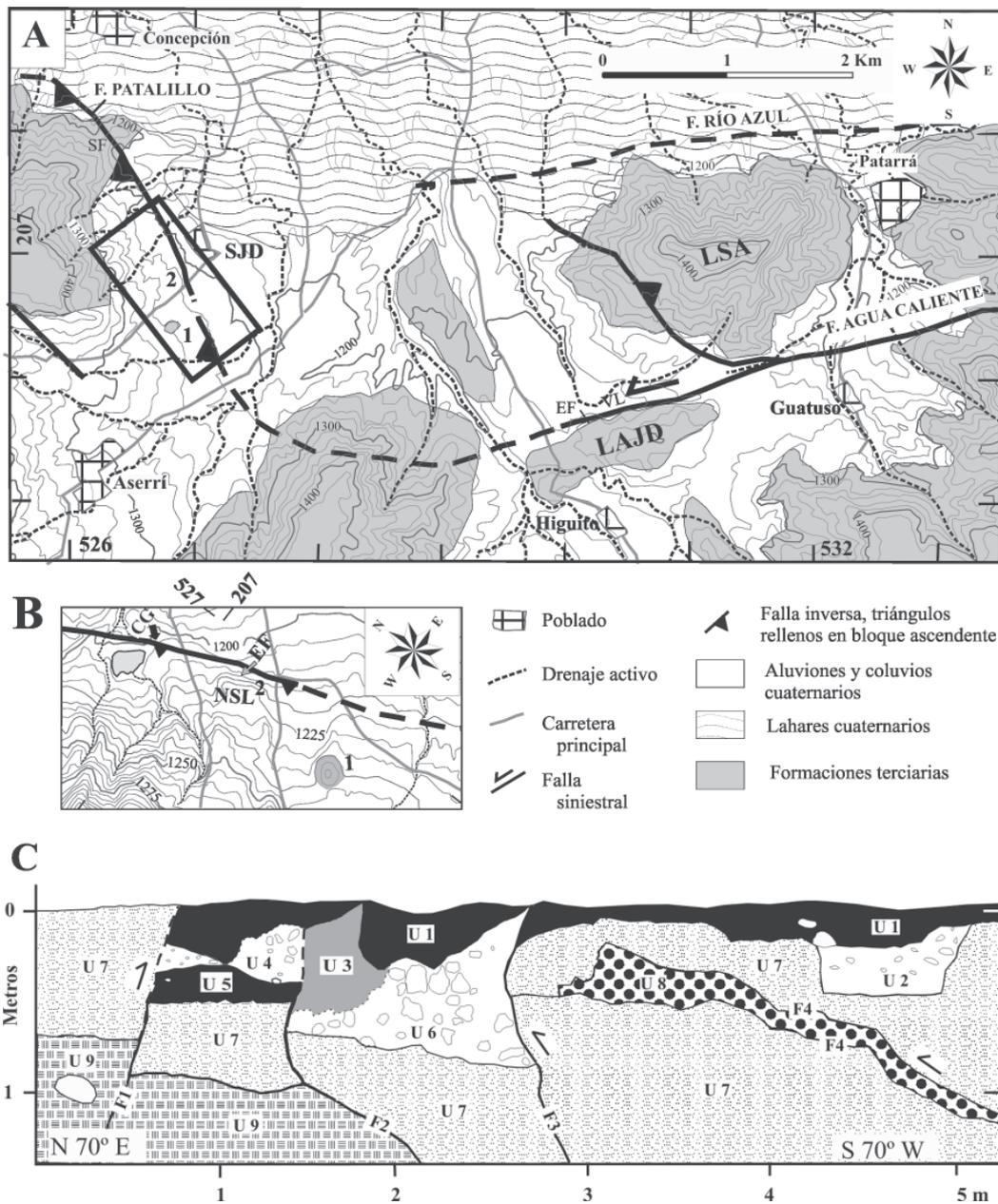


Fig. 3: A: Zona de unión de las fallas Patallillo y Agua Caliente. SJD es la localidad de San Juan de Dios y LSA y LAJD son las lomas Salitral y Alto Juan Dolores respectivamente. SF, NSL, EF y VL muestran respectivamente la ubicación de las geoformas: silla de falla, escarpe de falla y valle lineal. El recuadro rectangular muestra la zona que se detalla en B. Se numeran las curvas de nivel cada 100 m a partir de la altura de 1200. La geología proviene de Denyer y Arias (1990) y la base topográfica y geográfica de la hoja Abra 1:50 000 del IGN. B: Muestra una zona de detalle de la falla Patallillo. Se observa el escarpe de falla (EF) y el nivel subhorizontal levantado (NSL). Se ubican los sitios 1 y 2 según se explican en el texto. Las curvas de nivel provienen de la hoja Cucubres 1:10 000 del IGN. La flecha rellena al lado de CG indica la ubicación del corte geológico que se muestra en C. C: Corte geológico que muestra diferentes depósitos recientes fallados según se describe en el texto. U1: Suelo orgánico con clastos esporádicos, U2: Depósito de canal con clastos redondeados a subangulares, U3: Depósito de color castaño claro, U4: Cuña coluvial con fragmentos de fragmentos de ϕ hasta 5 cm, U5: Paleosuelo con fragmentos subredondeados y tiesto, U6: Cuña coluvial con fragmentos de ϕ hasta 15 cm, U7: Coluvio muy alterado, U8 Arcilla verde en parte inferior y menos arcillosa en la parte superior, U9: Transición del coluvio U7 menos alterado.

de San José, que causó daños menores, fue el ocurrido el 12 de julio de 1933, a las 6 horas y 50 minutos de la mañana (hora local). Este temblor causó alarma en la zona sur de esta ciudad. Schaufelberger & Jiménez (1933) señalan que este sismo se sintió con un movimiento vertical hacia abajo, e inmediatamente después se observaron fuertes retumbos en el Liceo de Costa Rica y en Zapote. Hubo algunas réplicas que se sintieron especialmente en el sector sur de la ciudad. Al primer temblor le estimaron una intensidad V Rossi-Forel (V Mercalli Modificada) y se percibió en Escazú, Aserrí, Curridabat, Moravia y Santo Domingo de Heredia, con un radio sentido de 10 km. Lo consideraron de foco superficial y de baja energía y con un epicentro ubicado en los alrededores del Liceo de Costa Rica. En el periódico *La República* se describe que el sismo no fue sentido en Cartago y que la parte principal oscilatoria fue de E a W. La información acerca de este sismo sugiere que bajo el sector sureste de la ciudad de San José se localiza una fuente sísmica que puede tener relación con la que tuvo actividad entre diciembre del 2000 y septiembre el año 2001.

FALLAMIENTO ACTIVO

La mayoría de las fallas recientes que se localizan dentro de la zona de estudio se encuentran descritas en Montero et al. (1998), Montero (2000) y con mayor detalle en Fernández & Montero (2002). Las principales del sector sureste y este son las fallas Agua Caliente, Río Azul (sugerida) y el sistema de fallas ciegas y pliegues asociados de Cipreses. En la zona sur y suroeste de la zona de estudio, se encuentran las fallas Belo Horizonte, Escazú y Aserrí y Patalillo (descrita adelante). La revisión de las fotografías aéreas y las investigaciones realizadas en nuevos afloramientos han permitido elaborar nuevas interpretaciones con respecto al fallamiento reciente. Con respecto al estudio de Fernández & Montero (2002), se realizan varios nuevos aportes los cuales se describen a continuación.

FALLA PATALILLO

Se interpreta como una falla de movimiento predominante inverso, aunque no se descarta una componente de rumbo (Fig. 3). Las evidencias de la falla Patalillo, incluyendo su componente de desplazamiento inverso, son las siguientes: 1) Al cortar la estribación montañosa, entre el sur de Concepción de Alajuelita y el SSW de San Juan de Dios de Desamparados, se evidencia por varias facetas triangulares que miran al NE y una silla de falla. 2) Del lado sur de la traza de falla, al S de San Juan de Dios de Desamparados, origina el levantamiento de las rocas de la Formación Coris, dentro de los abanicos coluvio-aluviales de la zona (sitios 1 y 2 en figura 3 a y b). Los anteriores afloramientos se presentan en lomas aisladas localizadas cerca y al sur del escarpe de falla, que en esta zona es discontinuo y poco prominente excepto localmente. Del lado norte de la traza de falla no se observan afloramientos similares de la Formación Coris. 3) Un escarpe de falla local dentro de los abanicos coluvio-aluviales se evidencia en el mapa de escala 1:10 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), hoja Cucubres. Por ejemplo, en el sitio 2 en la figura 3b, se observa un escarpe de falla (EF) y al SW de este se presenta un nivel subhorizontal, que fue levantado por la falla (NSL). En este lugar, los depósitos coluvio-aluviales sobreyacen a la Formación Coris.

El segmento de falla Patalillo se une mediante un trazo de falla sugerida con el extremo oeste de la falla Agua Caliente, que pasa por un valle lineal y origina un escarpe de falla del lado norte de la loma Alto Juan Dolores (LAJD en figura 3a).

DESCRIPCIÓN DEL CORTE GEOLÓGICO

En un corte geológico (ubicado en las coordenadas Lambert Norte 207,1 y 526, 8; CG en figura 3b), se observaron varias capas (U1 a U9

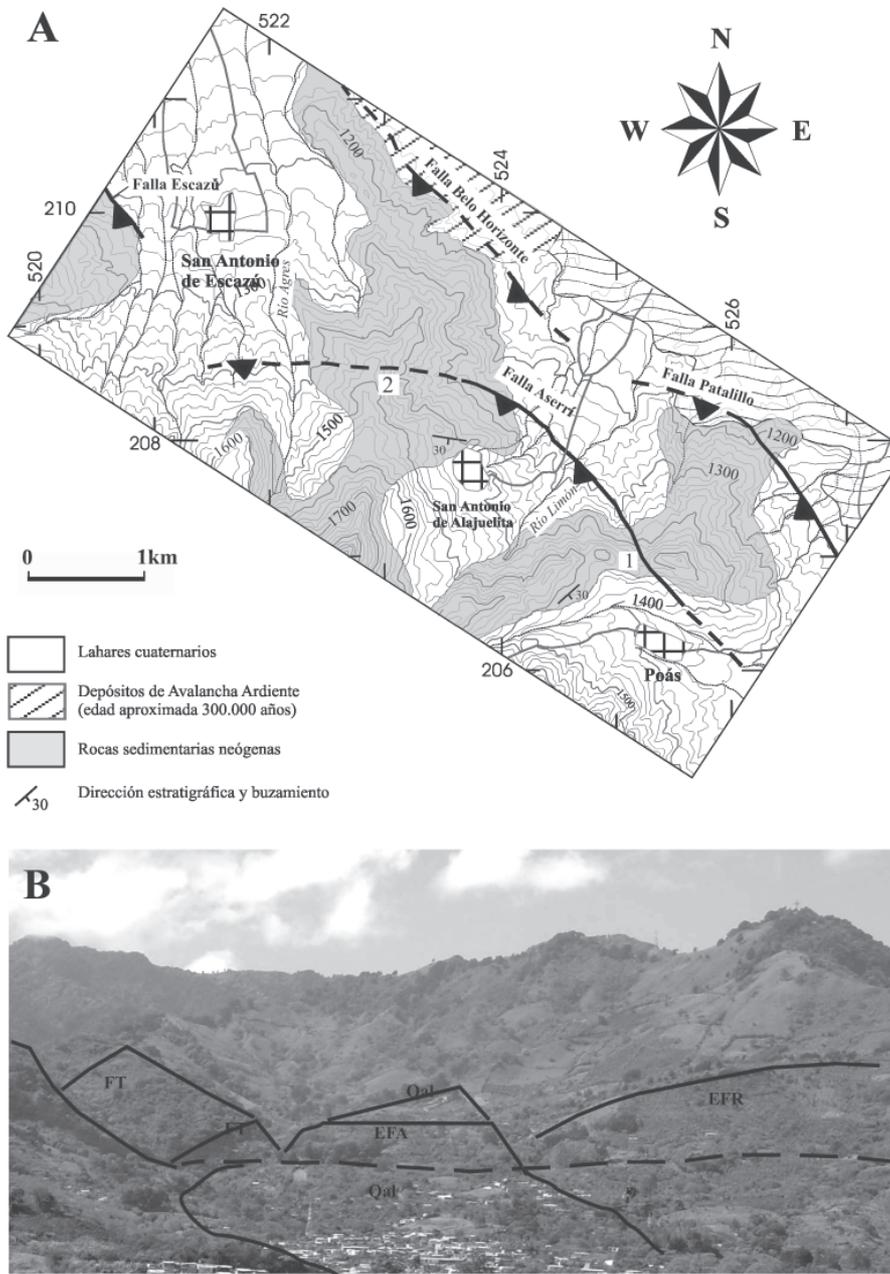


Fig. 4: A: Geomorfología y geología en la zona donde se ubica la falla Aserri. Además se muestra n otras fallas inversas cercanas. La geología proviene de Denyer y Arias (1990) y de Rivier (1979) (al oeste de la coordenada 524,0 E). La base topográfica y geográfica proviene de la hoja Abra 1:50 000 del IGN. B: Foto con vista al SW, tomada desde las coordenadas Lambert Norte 209,6 N y 526,4 E, la cual muestra el escarpe de falla facetado al N, al atravesar las divisorias y el abanico depositado entre otros por el río Limón (indicado como Qal). FT es el facetamiento triangular. EFA y EFR son respectivamente el escarpe de falla en el abanico y en las rocas terciarias.

en figura 3c), siendo las unidades U1 a U6 depósitos probablemente holocénicos, cortados por varias fallas con separación inversa (fallas F1, F3 y F4 en figura 3c). Además, se encontraron dos cuñas coluviales (depósitos U4 y U6), que se relacionan con la erosión de escarpitas de falla asociadas con las fallas F2 y F3 y con dos posibles eventos paleosísmicos diferentes. Efectivamente, el depósito U6 se depositó al pie de una escarpita de falla asociada con la falla F3. Acá, tenemos un primer evento paleosísmico.

Considerando que entre U6 y U7 no se encontró un paleosuelo sepultado, lo anterior implicaría que la diferencia de edad entre ambos depósitos es pequeña y por lo tanto no fue suficiente para el desarrollo de un paleosuelo. Por el contrario, del lado NE de la falla F2, entre U7 y la cuña coluvial U4 sí se presenta un paleosuelo sepultado (U5), luego de ocurrir un nuevo paleosismo, existiendo un tiempo para el desarrollo de un paleosuelo sobre U7. Esto sugiere que la falla F2 es más reciente que F3. Obsérvese que la falla F2 muestra evidencias de tener una componente de desplazamiento de rumbo, porque la unidad U6 no se encuentra del lado NE de esta falla. Además, el trazo de F2 en la parte inferior es típica de una falla inversa por su bajo ángulo, con el lado SW subiendo. Sin embargo, hacia arriba el trazo se hace subvertical y el lado NE aparentemente sube.

Lo anterior se explica por la componente de rumbo que tiene esta falla. Con respecto a la falla F1, esta corta los diferentes depósitos del corte, lo cual sugiere que es bastante reciente. Asimismo, como la falla F3 sugiere cortar el suelo orgánico (U1), esta podría haber sido reactivada muy recientemente. Del lado SW de esta falla, aparece un depósito de canal (U2) que se puede asociar con un riachuelo desviado por el levantamiento trasero a esta falla. Con respecto a la falla F4, su trazo de bajo ángulo y con pequeñas rampas es típica de fallas inversas.

La unidad U8, que es arcillosa en su parte inferior, se asocia con una zona de falla. En la parte superior, esta falla parece deformar la unidad coluvial U7. Como esta falla parece ser cortada por F3, es anterior a esta y podría ser la más vieja del corte. Desafortunadamente, no se cuenta con dataciones radiométricas de los depósitos

descritos. Sin embargo, en el paleosuelo U5 se encontró un tiesto, lo cual indica una ocupación indígena, que debe ser más reciente que 1000 a. C., que corresponde con las primeras ocupaciones indígenas que realizaron cerámicas en la zona central de Costa Rica (Ferrero, 1977).

FALLA ASERRÍ

Esta falla con un rumbo entre NW y EW, se interpreta que tiene un movimiento predominante inverso. La falla Aserrí ha sido referida por diversos autores (Denyer & Arias, 1990; Arias & Denyer, 1991; Woodward & Clyde, 1993; Fernández & Montero, 2002). Sin embargo, el trazo de la falla que se muestra en este trabajo difiere parcialmente con el de los anteriores autores, al igual que el tipo de desplazamiento predominante.

Las evidencias de la falla y su componente inversa son las siguientes (Fig. 4): 1) La falla se caracteriza por mostrar un prominente escarpe a lo largo de su traza (Figs. 4a y b). Este escarpe se observa tanto al atravesar rocas Cuaternarias como Terciarias. El escarpe que tiene la falla en las rocas cuaternarias, que son depósitos coluvio-aluvionales, es de menor altura (EFA en figura 4b) que el que muestra al atravesar las rocas Terciarias (EFR en figura 4b). El escarpe está facetado y mira al norte. 2) Un aspecto morfológico que sugiere una falla inversa es que el río Agres tiene un valle encajado y profundo y la divisoria oeste de este río tiene una morfología suave (ver zona de altura superior a 1600 m en figura 4a) del lado buzante de la falla, todo lo cual sugiere un levantamiento reciente.

El mapa geológico de Rivier (1979) muestra esta zona morfológica suave cubierta por depósitos Cuaternarios y por debajo de los mismos aflora la Formación Pacacua, del Mioceno, al pie del escarpe. El anterior cartografiado geológico concuerda con nuestra interpretación de una falla inversa (Fig. 4a). 3) La localidad de San Antonio de Alajuelita se localiza en una zona subhorizontal ubicada del lado suroeste del escarpe de falla, lo cual igualmente sugiere levantamiento reciente. 4) La falla, al cruzar la divisoria topográfica entre las localidades de San Antonio y

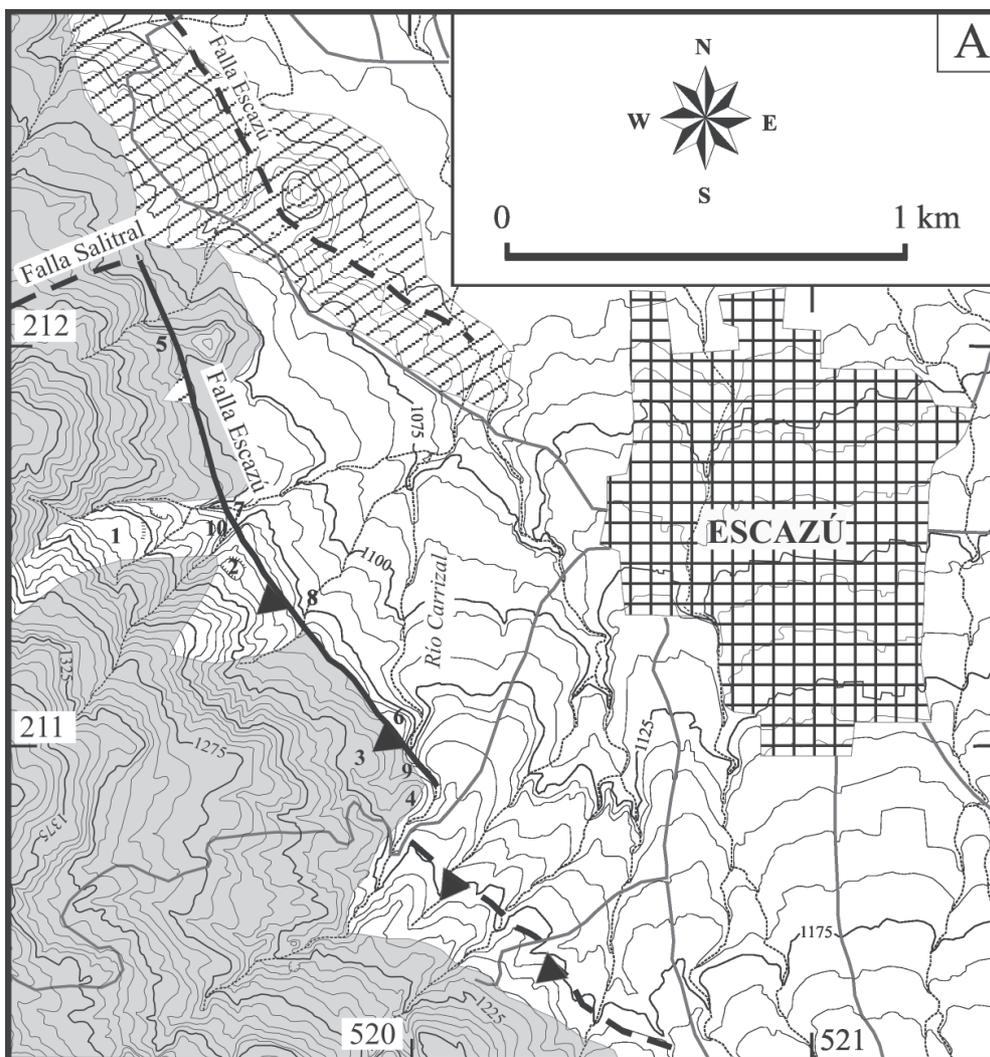


Figura 5 A: Geomorfología y geología en la zona donde se ubica la falla Escazú. La geología proviene de Rivier (1979) y la base topográfica y geográfica proviene de la hojas Salitral y Escazú de escala 1:10 000 del IGN. Simbología igual a las figuras 3 y 4.

Poás, se expresa morfológicamente por una silla de falla (sitio 1 en figura 4a) y origina un aparente movimiento derecho de la misma. Por otro lado, la falla al cruzar la divisoria topográfica entre San Antonio de Escazú y San Antonio de Alajuelita se expresa morfológicamente por un descanso en la topografía e inmediatamente al sur del mismo se observa un escarpe facetado al N, mientras que al norte de la falla, la divisoria se divide en dos (sitio 2 en figura 4a).

FALLA BELO HORIZONTE

La falla Belo Horizonte se encuentra bien descrita en Fernández & Montero (2002). Sin embargo, se puede agregar como evidencia de su componente de falla inversa, que tiene un escarpe facetado al noreste de tipo rectangular (Fig. 4). Este escarpe se encuentra al frente de una fila de rumbo noroeste que se encuentra levantada entre el valle donde se asienta Escazú y el de San



Fig. 5 B: Foto con vista al SW tomada en las coordenadas Lambert Norte 211,577 N y 519,513 E (sitio 10 en parte A). Muestra la falla inversa cortando depósitos cuaternarios (línea negra continua), la cual desplaza los depósitos de flujos de debris sobre depósitos de granulometrías medias a finas de un abanico (el contacto entre ambos se muestra con una línea punteada).

José. La presencia de una falla inversa explicaría el levantamiento de esta fila con respecto a las zonas de valles adyacentes.

FALLA ESCAZÚ

La falla Escazú, con un rumbo noroeste, se considera parte del sistema de falla predominantemente inverso. Con respecto a la falla Escazú, se realizan los siguientes nuevos aportes. Con base en el análisis morfotectónico y el trabajo de campo, el trazo de la falla se ha redefinido y reubicado un poco más al oeste con respecto al trazo mostrado en trabajos anteriores (p.e. Woodward & Clyde, 1993). El trazo se divide en dos sectores (Figs. 5a y 6). El que se ubica al W y SW de Escazú se considera activo (trazo continuo en figura 5), mientras que el que se localiza al NW de Escazú se estima como sugestivo de ser activo (a trazos en figura 5). El límite entre ambos sectores es la falla Salitral (Figs. 5a y 6). Las evidencias de la falla Escazú en el sector que se considera activo son las siguientes: 1) La

falla muestra un prominente escarpe de falla con rumbo entre NNW y NW. Localmente el escarpe es ligeramente curvado hacia el WSW y tiene alturas variables superiores a los 150 m con respecto a la topografía más suave que se localiza al este. El escarpe muestra facetamiento triangular con varias generaciones de facetas. En algunos sectores se muestra bastante disectado y con entrantes. 2) Hay varios niveles subhorizontales en la topografía de lado buzante de la falla y cercanos al pie de escarpe, que podrían corresponder con horizontes levantados por la falla (sitios 1 a 4 en figura 5). 3) Se ubica un cerro aislado, el cual está separado de la morfología del escarpe por una posible silla de falla (sitio 5) y un descanso en la topografía (sitio 6). Además, existe confluencia de quebradas ligeramente aguas arriba y aguas abajo de la traza de falla (sitios 7 a 9) y se observa dos cambios de rumbo anómalo en el río Carrizal al cruzar la traza, los cuales podrían corresponder con desvíos izquierdos (sitio 9 y al norte de 6). 4) En un corte ubicado en un camino en las coordenadas Lambert Norte 211,577 N y 519,513 E (sitio 10), se pudo observar un par de

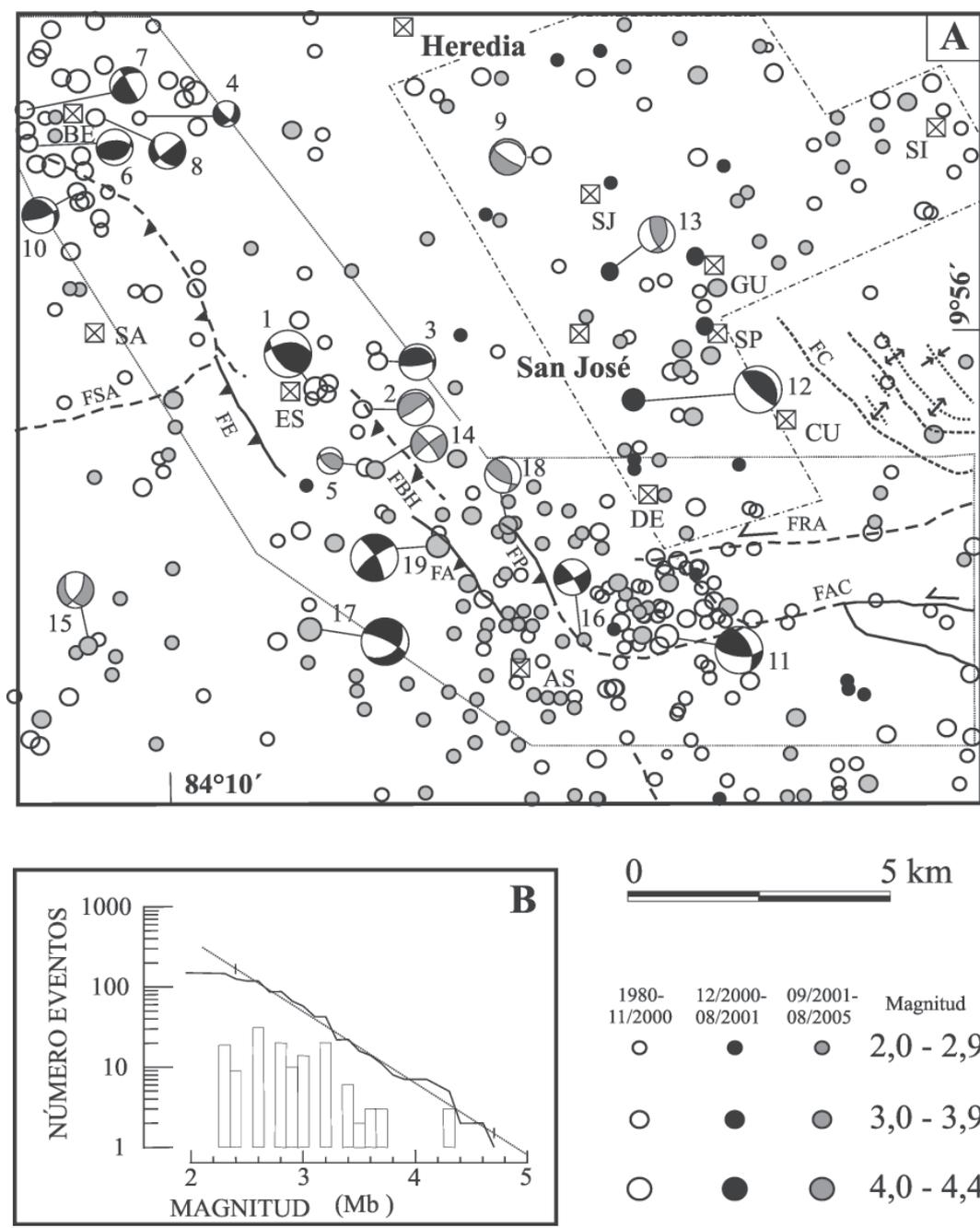


Fig. 6: A. Mapa sismotectónico y de epicentros de temblores ocurridos entre 1984 y el 2005. Se muestran las dos zonas sísmicas que incluyen la banda sísmica del este de San José y sur de Heredia (zona mostrada entre la línea a trazos y puntos) y la que se ubica al sur y suroeste de San José, la cual incluye la falla Agua Caliente y el relevo de compresión asociado. Igualmente se muestran los 19 mecanismos focales realizados por diversos autores (ver Cuadro 2), y que definen los tipos de movimientos predominantes en las fallas de la zona de estudio. Los centros de los poblados, indicados con las letras BE, SA, ES, AS, SJ, DE, GU, SP, CU y SI son respectivamente San Antonio de Belén, Santa Ana, Escazú, Aserri, San Juan de Tibás, Desamparados, Guadalupe, San Pedro, Curridabat y San Isidro de Coronado. Estos se muestran con un cuadrado cruzado. FSA es la falla Salitral. Otros nombres se explican en la figura 1. B. Recurrencia de temblores para la zona sísmica del sistema de falla Agua Caliente en el sector sur y oeste de San José.

depósitos de flujos de debris (bloques mayormente son de origen volcánico), cubiertos por depósitos de abanico de granulometrías medias a finas, cortados por una falla con una componente de separación inversa (Fig. 5b). La falla tiene una inclinación de unos 35° , con un buzamiento aparente al $N 60^\circ W$, dentro de los flujos de debris. El flujo de debris superior está en contacto por falla con los depósitos de abanico. La separación vertical del contacto superior del flujo de debris más joven es de alrededor de 1,6 m. La edad de los depósitos anteriores es desconocida, pero considerando que el perfil de suelo es bastante delgado, se estima que tienen una edad no más antigua que el Pleistoceno superior.

Con respecto a la traza sugestiva de ser activa, morfotectónicamente se identifica porque la traza pasa al pie y del lado este de una serranía bastante rectilínea de rumbo noroeste, donde se ubica el cerro Palomas (ver hoja Abra 1: 50 000 del IGN y figura 7). Localmente muestra un posible escarpe de falla y pasaría por una silla de falla (sitio 11) al noroeste de Escazú (Fig. 5a). Una trinchera realizada cerca del extremo sureste del escarpe (sitio 12), mostró una serie de fallas y fracturas paralelas a subparalelas al escarpe y un posible bolsillo de falla. Asimismo, las ignimbritas, cuya edad es de

unos 300 000 años (Pérez et al., 2002), se encuentran a unos 1100 m al oeste y noroeste de Escazú, como se puede observar en la figura 5a. Mientras que fuera del área de estudio, en las planicies cercanas a Santa Ana (ver ubicación en figuras 6 y 7), su altura es de alrededor de 900 m. Rivier (1979) sugirió que esta diferencia de elevación tiene un origen tectónico. Si la posición elevada de las ignimbritas se relaciona con la continuación de la falla de Escazú al noroeste, como una falla inversa ciega (según trazo sugerido en las figuras 6 y 7), eso explicaría la existencia de una fila levantada de rumbo noroeste arriba del piso del Valle Central, en donde se localiza el cerro Palomas. Una explicación alternativa para la diferencia de altura de las ignimbritas es que estas subieron la pendiente de la fila Palomas al depositarse en su sector este. Por esta razón, la evidencia de la continuación de la falla Escazú en su sector noroeste aún no es concluyente.

FALLAS EN EL SECTOR CENTRAL Y ESTE DE SAN JOSÉ

Debido a que la ciudad San José está casi completamente urbanizada resulta muy difícil

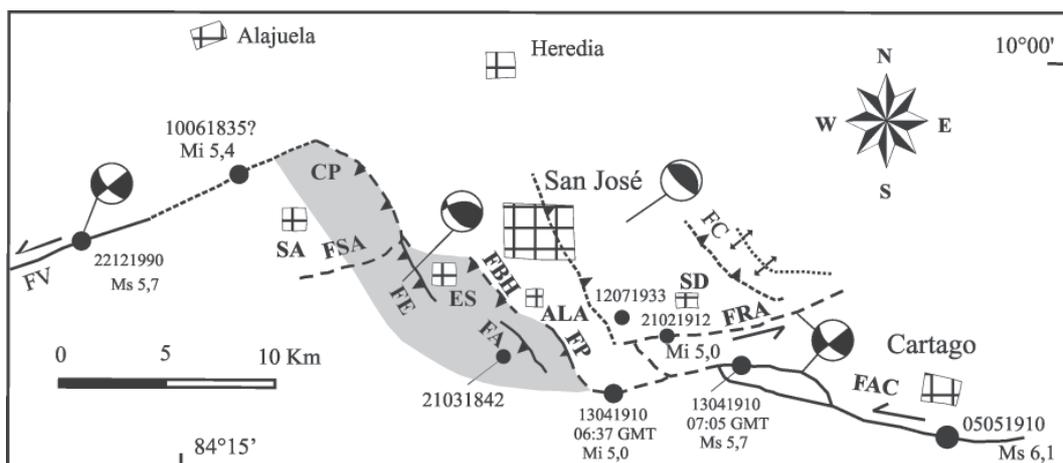


Fig. 7: Modelo tectónico que muestra los sistemas de falla Río Azul y Agua Caliente y su posible continuación con la falla Virilla (FV), los tipos de desplazamiento predominantes en cada segmento de falla y los mecanismos focales característicos. La zona en gris corresponde con la zona del relevo compresivo. Igualmente, se muestran los epicentros propuestos para los temblores dañinos históricos asociados con el sistema de falla. Se muestran algunas poblaciones afectadas por los terremotos. ALA es Alajuelita y SD es San Diego de Tres Ríos. CP es el cerro Palomas. Otros nombres se describen en las figuras 1 y 6.

realizar investigaciones de fallamiento activo. Hasta el presente no se han determinado evidencias de que una traza de falla activa corte las capas de suelo en algún sector de la ciudad. La única sugerencia de una posible falla proviene de Woodward & Clyde (1993), quienes ubicaron del lado suroeste de San José, un lineamiento de rumbo NW, que denominaron San Sebastián.

RELACIÓN ENTRE FALLAMIENTO ACTIVO, LA SISMOTECTÓNICA Y LA SISMICIDAD RECIENTE

La figura 6a muestra la relación entre la sismicidad, la sismotectónica y el fallamiento activo para la zona de San José y alrededores. A continuación describimos las diferentes zonas sísmicas que se pueden deducir de esa figura.

ZONA SÍSMICA DEL ESTE DE SAN JOSÉ

Los sismos extraídos de la base de temblores de la RSN (ICE-UCR) para el período 1984-2005, muestran una distribución espacial de rumbo NW, que es similar a la observada para la secuencia ocurrida entre diciembre del 2000 y agosto del 2001 (compárese la zona sísmica delineada con puntos y guiones de la figura 6a con la distribución de sismos de la figura 1). Asimismo, se observa que al norte parece continuar con una banda de sismicidad de dirección NE que se inicia cerca de la ciudad de Guadalupe y pasa por San Isidro de Coronado, la cual puede continuarse con una banda de actividad sísmica difusa de un rumbo E, que pasa al E y S de la ciudad de Heredia.

¿Cuál es la interpretación tectónica de la anterior banda de sismicidad?. El sistema de fallas ciegas y pliegues asociados de Cipreses, que se inclina al E puede continuarse al oeste con una falla de rumbo NW a NNW, que sería una falla inversa inclinada al E (Fig. 7). La falla sugerida Río Azul, con posible desplazamiento de rumbo sinistral sería el límite al sur del anterior conjunto de fallas inversas. Los mecanismos focales de falla inversa del este de San José, al igual que el

perfil sísmico, que sugiere un plano de falla que se inclina con ángulo entre 20° y 40° al E (Figs. 1 y 6), son consistentes con la anterior interpretación. Lo anterior implicaría que el sistema de falla de Cipreses se puede extender al oeste bajo la zona este de San José. Esto sugiere una propagación de este sistema de falla inverso al oeste de donde se expresa morfológicamente. Esta sería una falla inversa ciega de rumbo entre NW y N, limitada al sur por la falla sugerida Río Azul.

Se especula que la anterior banda de sismicidad de rumbo N a NW del E de San José se continua con otra de rumbo NE (localizada entre Guadalupe y San Isidro de Coronado, ver figura 6). Luego, esta banda sísmica se continuaría al sur y este de Heredia, la cual podría seguir al oeste con la banda sísmica que pasa por San Antonio de Belén.

FALLA AGUA CALIENTE Y RELEVO COMPRESIVO ASOCIADO

Del lado sur, suroeste y oeste de San José, existe una zona sísmica que se localiza cerca del límite del Valle Central con las estribaciones norte de la cordillera de Talamanca. Esta zona tectónica ha sido la más activa en el área de estudio entre los años 1984 y el 2005 (Fig. 6a). Los temblores han ocurrido como enjambres, sismos aislados o fueron disparados por el terremoto de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990 (Ms 5,7). Por ejemplo, la sismicidad localizada en los alrededores de San Antonio de Belén ocurrió en febrero de 1991, poco después del anterior terremoto. Los temblores de la zona de Escazú ocurrieron en noviembre del 2002 y en enero y en septiembre de 1993 como pequeños enjambres. Asimismo, Fernández & Montero (2002) describen tres enjambres de temblores, ocurridos entre Desamparados y Aserrí, en junio y octubre de 1994 y en noviembre de 1997. Un nuevo enjambre de temblores ocurrió en esta última zona entre el 3 de abril y el 16 de abril del 2004. El sismo principal de esta secuencia fue el del 4 de abril a las 10:51 GMT (Mc 3,7).

Según nuestra interpretación, la anterior sismicidad se relaciona con la falla de desplazamiento izquierdo Agua Caliente, de un rumbo cercano al E-W (Fernández y Montero, 2002), la cual se continúa al oeste con un relevo compresivo, caracterizado por un cambio de rumbo al NW y en el tipo de fallamiento que incluye a las fallas inversas Patalillo, Aserrí, Belo Horizonte y Escazú (Figs. 6a y 7). Las evidencias a favor de esta hipótesis son: 1) La loma Salitral es una loma aislada ubicada en medio de un valle amplio al norte y angosto al sur. Su ubicación anómala se explica por el desplazamiento sinistral a lo largo de la falla Agua Caliente, la cual pasa del lado sur de la misma, provocando la formación de un valle encerrado entre Higuito y Guatuso (Fig. 3a). 2) Los mecanismos focales 11 y 16 realizados en este sector de la falla (Fig. 6a) muestran una componente de desplazamiento sinistral a lo largo del plano nodal de rumbo paralelo a la falla Agua Caliente. 3) La expresión morfotectónica de las fallas Patalillo, Aserrí, Belo Horizonte y Escazú es similar, dado que estas muestran escarpes facetados al este. Esto sugiere o fallas con componente normal o inversa. Los datos morfológicos y geológicos son consistentes con la interpretación de que las fallas Escazú, Aserrí y Patalillo tienen componente inversa (Figs. 3, 4 y 5). 4) Hay una tendencia en la distribución epicentral en ubicarse del lado oeste de las fallas inversas, del lado hacia el cual se interpreta que estas se inclinan (Fig. 6a) y 5) Los mecanismos focales realizados en la zona donde se localizan las anteriores fallas por parte de Fernández (1995), Fernández & Pacheco (1998) y Fernández & Montero (2002) y los nuevos mecanismos focales reportados en este trabajo son predominantemente de falla inversa (mecanismos focales 1, 2, 3, 5, 6 y 18 en figura 6a), o son de desplazamiento oblicuo con componente inversa (mecanismos 7 y 10 en figura 6a).

Debe observarse que también se han obtenido dos mecanismos focales de desplazamiento de rumbo bastante puro, con rumbos similares en sus planos nodales, pero con desplazamientos contrarios (comparar mecanismos 14 y 19 en figura 6a). Estos se podrían explicar como

rampas laterales a las fallas inversas. También hay mecanismos oblicuos con componente normal en la esquina noroeste, cerca de San Antonio de Belén (mecanismos 4 y 8). En todo caso, las zonas de relevos compresivos se caracterizan en general por tener una tectónica compleja y localmente pueden presentarse tensiones.

Un aspecto que resalta de la sismicidad de esta zona es que la gran mayoría de los temblores y enjambres que han ocurrido entre 1984 y el 2005 tuvieron su epicentro en la zona de cambio de rumbo de la falla Agua Caliente, donde se continúa con la zona de fallamiento inverso que se inicia con la falla Patalillo (Fig. 6a). Esta es una zona de acumulación de esfuerzos que podría corresponder con una barrera geométrica, que representó un sitio donde terminó una ruptura de algún evento sísmico. Como se verá adelante, la sismicidad histórica nos indica que los temblores que ocurrieron el 13 de abril de 1910 (06: 37 GMT y 07:05 GMT) pudieron haber generado la ruptura del sector de la falla Agua Caliente ubicada al este de la zona de cambio de rumbo. Por lo tanto, las rupturas de abril de ese año terminaron contra una barrera geométrica que se identifica por un cambio en el rumbo en el sistema de la falla Agua Caliente y en el tipo de mecanismo de la falla (de desplazamiento de rumbo a inverso).

Un asunto que no ha sido dilucidado con certeza, es hasta dónde llega al noroeste la extensión activa de la falla Escazú. La interpretación de las fotos aéreas y la investigación de campo no ha permitido determinar con certeza que la falla Escazú está activa en su sector noroeste. De hecho, la falla Salitral de rumbo ENE (ver figura 6a), descrita en Woodward & Clyde (1993) como sugestiva de ser activa, y que tiene un escarpe facetado al norte, marca una frontera entre el sector activo y el sugerido de ser activo. Esta falla marca un contraste morfológico, dado que el bloque del lado sur es topográficamente más alto. También podría ser que la falla Escazú se continúe al noroeste como una falla inversa ciega. La sismicidad ubicada del lado oeste del sector de la falla Escazú, sugerido como activo, al igual que las ignimbritas cuaternarias levantadas (si se considera que es origen tectónico)

y la disposición morfológica de una fila levantada arriba del nivel del Valle Central, donde se ubica el cerro Palomas, estaría más de acuerdo con esta última interpretación. En ese caso, la falla Salitral podría corresponder con una rampa lateral que levanta el lado sur más que el norte, lo cual favorecería el afloramiento de la falla Escazú, donde ha sido identificada.

Es factible suponer que la falla Agua Caliente no termine al oeste en el relevo compresivo discutido previamente. Esto abre la posibilidad de que el sistema de falla Agua Caliente se continúe al oeste del relevo compresivo. En este caso tenemos dos posibles alternativas para esa extensión del sistema de falla Agua caliente. La primera sería que la falla Salitral corresponda con un segmento de falla en la continuación del sistema la falla Agua Caliente al oeste. La segunda alternativa es que la falla Escazú se extienda como falla ciega bajo la fila Palomas y luego exista una falla de rumbo izquierdo de rumbo ENE, que se localizaría del lado norte de la población de Santa Ana. En la figura 7 se muestra esta última posibilidad aunque no se descarta la primera. Debe observarse que más al oeste se ha identificado la falla siniestral Virilla (Montero et al., 1991), con un rumbo similar al sistema de falla Agua Caliente y con el mismo tipo de desplazamiento. Esa falla se identificó en Montero et al. (1991) como una falla corta (de unos 10 km de extensión), sin conexión con otras fallas. Es por tanto posible sugerir que la falla Virilla forme parte del sistema de falla Agua Caliente, lo cual aumentaría considerablemente la extensión de este sistema de falla dentro del Valle Central y su importancia como fuente de amenaza sísmica, tema que será discutido a continuación (Fig. 7).

INTERPRETACIÓN TECTÓNICA DE LA SISMICIDAD HISTÓRICA DEL VALLE CENTRAL Y AMENAZA SÍSMICA

Como se indicó previamente, la actividad de terremotos históricos y recientes ocurridos en la parte sur del Valle Central sugiere la posibilidad de que el sistema de falla Agua Caliente se relacione con la falla Virilla, donde se originó

el terremoto de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990 (Ms 5,7). En la figura 7 se muestra una síntesis tectónica que incluye el sistema de falla Agua Caliente y la posible conexión del mismo con la falla Virilla y los diversos tipos de mecanismos focales que caracterizan a los diferentes segmentos de falla. Igualmente se muestra la posible relación de varias rupturas asociadas con terremotos históricos, que pueden haber ocurrido a lo largo del sistema de falla y se muestran algunas localidades que fueron afectadas por esos sismos. Aparte de la ruptura de 1990, tenemos los siguientes sismos que se pueden asociar con este sistema de falla: 1) Sismo del 10 de junio de 1835, que causó daños en Alajuela y Escazú (Peraldo & Montero, 1999). 2) Temblor del 21 de marzo de 1842, que originó daños en Alajuelita y que puede asociarse con la falla Patalillo, Aserrí o con la Belo Horizonte. 3) El 13 de abril de 1910 ocurrieron dos terremotos en la zona de Patarrá, Higuito y Guatuso (ver ubicación de localidades en figura 3a), los cuales se pueden asociar con el extremo oeste de la falla Agua Caliente. 4) El terremoto del 4 de mayo de 1910 se ha relacionado con una ruptura de la falla Agua Caliente, en el sector ubicado al sur de la ciudad de Cartago (Montero y Miyamura, 1981; ver figura 7). Si el anterior modelo de rupturas relacionadas con el sistema de falla Agua Caliente-Virilla es válido, quedarían algunos segmentos del sistema de falla sin romper. Entre estos destaca el que se podría ubicar cerca de la localidad de Santa Ana. Sin embargo, una interpretación alternativa es que el temblor del 10 de junio de 1835, por los daños ocurridos entre Alajuela y Escazú pudo haber ocurrido en este sector de falla. También hay algunos segmentos de falla inversa entre el noroeste de Escazú y la zona de Aserrí sin rupturas históricas. Un aspecto que resalta del análisis de localidades afectadas por los sismos históricos (Peraldo & Montero, 1994; Montero & Miyamura, 1981), es que estos afectaron localidades diferentes y por tanto, parece que esos sismos ocurrieron en diferentes segmentos de falla del sistema.

Con respecto a la falla Río Azul y el sistema de fallas ciegas y pliegues de Cipreses, tenemos

Cuadro 3

Estimación de longitudes de ruptura subsuperficiales para terremotos ocurridos entre 1835-2005

Fecha sismo	Magnitud (M_s o M_i)	Longitud de ruptura (km)
10 06 1835	5,4 (M_i)	(6)
21 03 1842	5,4 (M_i)	(5)
13 04 1910 (06:37 GMT)	5,0 (M_i)	(3)
13 04 1910 (07:05 GMT)	5,6 (M_s)	8
05 05 1910	6,1 (M_s)	16
22 12 1990	5,7 (M_s)	9

M_s es la magnitud de ondas superficiales y provienen de Ambraseys & Adams (2001). M_i es la magnitud estimada de intensidades según se reportan en Peraldo & Montero (1999) para los sismos de 1835 y 1842 y en Montero & Miyamura (1982) para el sismo del 13 de abril de 1910 (06:37 GMT). En la columna de longitud de ruptura, los valores entre paréntesis son aproximados de las

que el 21 de febrero de 1912 ocurrió un temblor dañino en San Diego de Tres Ríos. Este se puede asociar con el extremo oeste de la falla Río Azul (ver figura 7), aunque tampoco se puede descartar su asociación con las fallas inversas de Cipreses. Asimismo, el temblor del 12 de julio de 1933 puede relacionarse con el sector sur de la falla inversa ciega del este de San José, que forma parte del sistema de falla inverso de Cipreses.

Para conocer mejor los sectores sin ruptura y los que se han desplazado recientemente es necesario determinar mejor las magnitudes de los terremotos históricos (anteriores a 1900) o usar técnicas paleosísmicas. Con los terremotos del siglo pasado es posible estimar las longitudes de ruptura subsuperficiales de las magnitudes estimadas usando las relaciones de Wells & Coppersmith (1994), aunque queda la incertidumbre de las ubicaciones precisas de las rupturas de los sismos.

El error implícito en la estimación de la magnitudes provenientes de datos de intensidad (M_i), sumado al error propio de las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), para los tres primeros sismos del Cuadro 3, nos llevan a considerar las longitudes de ruptura de los sismos de 1835, 1842 y del 13 de abril de 1910 (06:37 GMT) como valores aproximados. Para los siguientes tres sismos el error de cálculo de magnitud es menor, por lo que las estimaciones

de las longitudes de ruptura subsuperficiales son más confiables. La sumatoria de las longitudes de ruptura ocurridas a lo largo del sistema de falla Agua Caliente-Virilla dan un valor de 47 km. Un enfoque diferente es tratar de determinar el grado de actividad de los sistemas de falla Agua Caliente y Río Azul a partir de la sismicidad reciente, usando la relación de Gutenberg & Richter (1954), la cual se expresa como:

$$\log N = a - b \cdot M \quad (2)$$

donde N es el número de sismos de magnitudes mayores a M, a es una constante que se relaciona con la actividad sísmica de la fuente y que varía de acuerdo con las dimensiones del área seleccionada y con el período de tiempo utilizado y b es la pendiente de la distribución de magnitudes. Para obtener el período de retorno de sismos de diversas magnitudes de interés se dividió el área de estudio en dos zonas sísmicas que corresponden aproximadamente con los sistemas de falla Agua Caliente y el Río Azul-Cipreses (Fig. 6a). En la estimación se usó la sismicidad ocurrida entre los años 1985 y el 2003 a partir del catálogo sísmico de la RSN (ICE-UCR). Para el sistema de falla Agua Caliente en el intervalo entre las magnitudes 2,4 y 4,7 se encontró la siguiente relación de recurrencia (Fig. 6b):

$$\text{Log}N=2,90(\pm 0,1)-0,89(\pm 0,03) \cdot M \quad (3)$$

Para la zona sísmica de San José, la relación de recurrencia que se obtuvo para el tiempo indicado cubre el intervalo de magnitudes 2,3 y 3,6, por lo cual se considera que la relación no es confiable. Asimismo, la relación para el sistema de falla Agua Caliente debe considerarse como una aproximación, porque el intervalo de magnitudes que cubre es pequeño. De acuerdo con la relación 3, un sismo con una magnitud como el de Cartago de 1910 (Ms 6,1) ocurriría aproximadamente cada 340 años, mientras que sismos como el Piedras Negras de 1990 (Ms 5,7), ocurrirían aproximadamente cada 150 años.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La sismicidad ocurrida entre diciembre del 2000 y septiembre del 2001 sugiere la existencia de una falla con un rumbo nor-noroeste bajo el sector este de San José, interpretación que es corroborada por la actividad registrada durante los últimos 20 años y por un evento ocurrido en 1933, que se puede asociar con la misma falla. Esta falla de tipo inverso es probablemente ciega y parece formar parte de la serie de fallas inversas de Cipreses, las que se relacionan con un relevo compresivo asociado con la falla Río Azul. Investigaciones adicionales son requeridas para conocer mejor las características del fallamiento que se ubica bajo el área urbana del este de San José y la amenaza sísmica que representa para el entorno poblacional.

Por otro lado, la geomorfología tectónica, la sismicidad y la sismotectónica y los datos geológicos indican la existencia del sistema de falla Agua Caliente, el cual está constituido por diferentes segmentos de falla. Este incluye la falla sinistral Agua Caliente, la cual se ubica entre el sur de las ciudades de San José y de Cartago. Esta falla se continúa al oeste con un salto a la derecha, que origina un relevo compresivo, que incluye las fallas de desplazamiento predominantemente inverso Patalillo, Aserrí, Escazú y Belo Horizonte. Al oeste de la zona compresiva, el sistema de falla se puede continuar con la falla Salitral o con una falla que se ubicaría del lado norte del poblado de Santa Ana. En el primer

caso el relevo compresivo tendría un ancho de 10 km y sería de 15 km en el segundo caso. Más al oeste, se sugiere que el sistema de falla Agua Caliente se continúa hasta unirse con la falla Virilla.

A lo largo del sistema de falla Agua Caliente-Virilla han ocurrido al menos cinco rupturas históricas (sismos del 21 de marzo de 1842, dos eventos el 13 de abril de 1910, 4 de mayo de 1910 y 22 de diciembre de 1990) y una probable (la del 10 de junio de 1835). La suma de las longitudes estimadas de ruptura subsuperficiales asociadas con esos terremotos históricos es de 47 km. Para el sismo del 4 de mayo de 1910 (Ms 6,1) se estima una longitud de ruptura subsuperficial de 16 km. Sin embargo, el segmento de falla cartografiada al sur de Cartago es de unos 10 km (entre los valles de Coris y de Cartago), lo cual sugiere que la falla debe extenderse al este más de lo mostrado en la figura 7. Woodward & Clyde (1993) sugieren que la falla se extiende pasando al sur de la población de Paraíso, hasta alcanzar la falla Navarro. Se requiere más investigación de campo para corroborar esta sugerencia.

De acuerdo con nuestra interpretación, la secuencia sísmica de 1910 rompió la falla Agua Caliente entre el sur de San José y el sur de Cartago hasta cerca de Paraíso. Hacia el oeste, la ruptura no se propagó al existir una barrera geométrica, representada por un relevo compresivo. De acuerdo con Oglesby (2005), relevos de tipo inverso normalmente impiden la continuación de una ruptura especialmente si no existe una falla inversa continua que conecte los segmentos de falla de desplazamiento de rumbo. Ese parece ser el caso del relevo compresivo asociado a la falla Agua Caliente, donde se han reconocido varias fallas inversas activas (Patalillo, Aserrí, Belo Horizonte y Escazú) y no parece existir una sola falla que conecte los segmentos transcurrentes. Desde el punto de vista de la amenaza sísmica esta es una situación favorable porque las rupturas asociadas con terremotos serán de menor extensión y tendrán magnitudes, que en el caso del sistema de falla Agua Caliente, de acuerdo con la longitud de los segmentos identificados tendrán valores máximos entre 6,0 y 6,5 Ms.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con el financiamiento parcial de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, proyecto "Monitoreo y Análisis de Secuencias Sísmicas de Costa Rica", No 113-A1-059. Igualmente, se agradece a Guillermo Alvarado y un árbitro anónimo por su revisión y sus valiosos comentarios. Se agradece a Carlos Redondo y Luis F. Brenes por su colaboración. Asimismo, a Mario Fernández, quien participó en una de las giras de campo, en las que se recopiló información analizada en este trabajo.

REFERENCIAS

- AMBRASEYS, N. N. & ADAMS, R. D., 2001: The seismicity of Central America. A descriptive catalogue 1898-1995.- 309 págs. Imperial College Press, Londres.
- ARIAS, O., & DENYER, P., 1991: Estructura geológica de la región comprendida en las hojas topográficas Abra, Caragres, Candelaria y Río Grande, Costa Rica.- Rev. Geol. Amer. Centr., 12, 61-74.
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1990: Geología de la hoja Abra.- Escala 1: 50 000, IGN, San José.
- FERNÁNDEZ, M., 1995: Análisis sísmico en la parte central de Costa Rica y evaluación del hipotético sistema de falla transcurriente de Costa Rica.- 85 págs. + apéndices. Univ. Nacional Autónoma, México [Tesis Maestría].
- FERNÁNDEZ, M. & MONTERO, W., 2002: Fallamiento y sismicidad entre Cartago y San José.- Rev. Geol. Amér. Centr., 26: 25-37.
- FERNÁNDEZ, M & PACHECO, J., 1998: Sismotectónica de la región central de Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Centr., 21: 5-23.
- FERRERO, L., 1977: Costa Rica Precolombina.- 489 págs. Editorial Costa Rica, San José.
- GUTENBERG, B. & C. RICHTER, 1954: Seismicity of the Earth and Associated Phenomena.- 440 págs. Princeton University Press, New York.
- HAVSKOV, J. & OTTOMÖLLER, L., 2000: SEISAN: The earthquake analysis software for WINDOWS, SOLARIS and LINUX, version 7.1.- 240 págs. Institute of Solid Earth Physics, Univ. de Bergen, Noruega.
- MARSHALL, J., FISHER, D. & GARDNER, T. W., 2000: Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block.- Tectonics, 19: 468-492.
- MATUMOTO, T., LATHAM, G., OHTAKE, M. & UMAÑA, J., 1977: Crustal structure in Southern Central America.- Bull. Seism. Soc. Am., 67: 121-134.
- MONTERO, W., 2000: Sismología y Neotectónica.- En DENYER, P & KUSSMAUL, S. (eds.): Geología de Costa Rica.- Ed. Tecnológica de Costa Rica: 219-239.
- MONTERO, W., 2001: El Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá.- Rev. Geol. Amer. Centr., 24: 29-56.
- MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G. E., COWAN, H., MACHETTE, M. N., HALLER, K. M. & DART, R. L., 1998: Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Costa Rica and its Offshore Regions.- Open-File Report 98-481, U. S. Geological Survey, 63 págs. + mapa escala 1: 500 000.
- MONTERO, W. & MIYAMURA, S., 1981: Distribución de intensidades y estimación de los parámetros focales de los terremotos de Cartago de 1910, Costa Rica,

- América Central.- Revista Inst. Geogr. Nacional, Julio-Diciembre: 9-34.
- MONTERO, W.; ROJAS, W., BOSCHINI, I., BARQUERO, R. & FLORES, H., 1991: Neotectónica de la región de Puriscal. Origen de la sismicidad de mayo-diciembre de 1990. V Seminario Nacional de Geotecnia. Ier. Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, p. 4.38-4.51.
- OGLESBY, D. D., 2005: The dynamics of strike-slip step-overs with linking dip-slip faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95: 1604-1624, doi: 10.1785/0120050058.
- PERALDO, G., & MONTERO, W., 1999: Sismología Histórica de América Central.- 347 págs. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, Publ. No. 513.
- PÉREZ, W. (2000) Vulcanología y petroquímica del evento explosivo del Pleistoceno Medio (0.33 Ma) del Valle Central, Costa Rica.- 170 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis Lic.]
- RIVIER, F., 1979: Geología del área norte de los cerros de Escazú, cordillera de Talamanca, Costa Rica.- *Revista Inst. Geogr. Nacional*, Enero-Junio: 99-137.
- SCHAUFELBER, P. & JIMÉNEZ, E., 1933: Algunas nociones sobre terremotos y temblores en Costa Rica.- 31 págs. Apuntes de Geología 7, Publicaciones Liceo de Costa Rica, No 15, Imprenta La Tribuna, San José.
- WELLS, D. L., & COPPERSMITH, K. J., 1994: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement.- *Bull. Seism. Soc., Am.*, 84: 974-1002.
- WOODWARD & CLYDE, 1993: A preliminary evaluation of earthquake and volcanic hazards significant to the major population centers of the Valle Central, Costa Rica.- 89 págs. + 6 planos. Reporte final preparado para Ret Corporation.,.