

Implicaciones neotectónicas y estructurales con base en paleosismología del sector sur de la Zona Transpresiva de Cartago, Costa Rica

Neotectonic and structural implications based on paleoseismology of the southern sector of the Cartago Transpression Zone, Costa Rica

Walter Montero-Pohly^{1*}, Luis Obando-Acuña², Alejandro Argüello-Sáenz²,
José J. Martínez-Díaz³ y Wilfredo Rojas-Quesada¹

¹Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas,
Apdo. 11501-2060, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

²Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, Apdo. 214-2060,
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

³Universidad Complutense, Facultad de Ciencias Geológicas. IGEO (CSIC, UCM), Ciudad
Universitaria s/n, 28040-Madrid, España

*Autor para contacto: wmonteropo@gmail.com

(Recibido: 03-07-2020; aceptado: 02-09-2020)

RESUMEN: En este trabajo se presentan los principales resultados de los estudios de paleosismología realizados en trincheras excavadas en la falla Cocorí, ubicada en el sector sur de la Zona Transpresiva de Cartago, en las cuales se determinó por medio de dataciones Carbono 14, deformaciones anteriores a 28000 años y posteriores a 10000 años (final del Pleistoceno Superior y el Holoceno). La deformación observada corresponde con fallas inversas con componente de rumbo, presumiblemente izquierda. También se observó deformación plástica, donde los anticlinales muestran vergencia al sur. Dos de las fallas determinadas tienen desplazamientos del orden métrico, y se definieron varios plegamientos con amplitudes cercanas al metro. Sin embargo, el bajo ángulo de las fallas o las características dúctiles de los materiales involucrados en la deformación no favorecieron encontrar evidencia estratigráfica de rupturas cosísmicas superficiales. Esto limitó poder determinar la ocurrencia de paleosismos dentro de un rango temporal apropiado. Un modelo neotectónico esquemático incorporando dos pliegues por flexión de falla (fault-bend folds), de rumbo cercano al este-oeste, permiten explicar las características geomórficas y estructurales de la falla Cocorí.

Palabras clave: geomorfología tectónica; Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica; sistema de falla Aguacaliente; falla Cocorí; pliegue por flexión de falla.

ABSTRACT: In this work we present the principal results of a paleoseismological study performed in trenches dug across the Cocorí fault, located at the southern part of the Cartago Transpression Zone. Based on radiocarbon dating we define tectonic deformations occurred before the last 28000 years and after 10000 years (last part of the Upper Pleistocene and Holocene). The tectonic deformations observed in the trenches are thrust faults with a strike-slip component, probably sinistral. We also defined plastic deformation, where the anticlines show south vergence. Two of the faults had metric displacements and various folds had nearly metric amplitudes. However, the low angle of the faults and the ductile behavior of the materials involved in the deformation, do not allowed us to find evidence of coseismic surface ruptures. This limitation implied that we do not being able to temporally bracket the occurrence of any paleoearthquake. A schematic neotectonic model of two fault-bend folds, trending nearly east-west, allows us to explain the geomorphological characteristics of the southern sector of the Cartago Transpression Zone and the structural observations found in the different trenches.

Keywords: Tectonic geomorphology; Central Costa Rica Deformed Belt; Aguacaliente fault System; Cocorí Fault; Fault-bend fold.



INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta publicación es presentar los principales resultados obtenidos a partir de tres estudios de paleosismología realizados en el sitio Cocorí, ubicado al sur de la ciudad de Cartago, con el fin de mejorar el conocimiento con respecto al grado de actividad y la amenaza sísmica asociada con la zona transpresiva de Cartago (Figura 1B), la cual fue reconocida por primera vez en Montero, Rojas y Linkimer (2013b). Los tres estudios de trincheras fueron realizados en los años 1991, 2009 y 2016. Los resultados detallados de los dos primeros estudios de trincheras se encuentran inéditos en Montero, Obando, Mora, Salazar y Leandro (1991) y en Montero, Obando y Rojas (2009). Ambos se realizaron para evaluar la amenaza por ruptura de falla para un proyecto habitacional ubicado dentro de un terreno propiedad del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU). Considerando la evidencia de deformación neotectónica observada en estos dos primeros estudios y la ausencia de dataciones radiométricas en los mismos, se consideró necesario visitar el sitio Cocorí nuevamente en el año 2016, como parte de las actividades de un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MICIT), mediante el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), que en adelante se denomina MICIT-CONICIT. En este último estudio se logró determinar edades radiométricas para un par de depósitos y además se realizaron nuevas observaciones estructurales y neotectónicas en el sitio Cocorí. La información obtenida a partir de los tres estudios mencionados permite caracterizar la estratigrafía y la estructura tectónica del sitio Cocorí y elaborar un modelo neotectónico para el sector sur de la zona transpresiva de Cartago.

MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO

Costa Rica se encuentra ubicada en el borde suroeste de la zona de subducción entre las placas Coco y Caribe, con un movimiento interplaca de 90 mm/año al N30°E (DeMets, 2001) (Fig. 1A). El bloque de Panamá forma parte del sector sureste de la placa cabalgante Caribe, cuyo límite oeste es el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). El CDCCR representa una zona de deformación ancha que atraviesa la región central del país, y está caracterizada por fallas activas sinestrasales de rumbo este a noreste y dextrales de rumbo norte a noroeste (Marshall, Fisher y Gardner, 2000; Montero, 2001; Montero, Lewis, Marshall, Kruse y Wetmore, 2013a).

La zona de estudio se ubica en el sector este del CDCCR y en el sector sur de la Zona de Transpresión de Cartago (ZTCA) (Figs. 1A y 1B). La ZTCA fue relacionada por Montero et al. (2013b) con un relevo compresivo entre las fallas Aguacaliente y Capellades (Fig. 1B). La ZTCA atraviesa transversalmente el valle donde se ubica la ciudad de Cartago y el sector sur del macizo del volcán Irazú. Abanicos laháricos intercalados con depósitos piroclásticos, cubiertos localmente por depósitos aluviales caracterizan los alrededores de la ciudad de Cartago, mientras que en el flanco sur del volcán Irazú predominan lavas y otros depósitos de origen volcánico (Fig. 1B; Quintanilla, Alvarado, Marín y Durán, 2008; Montero et al., 2013b).

METODOLOGÍA

Las técnicas de excavación y de levantamiento de las trincheras con fines de paleosismología aplicadas en este estudio se encuentran bien descritas en diversos trabajos (por ejemplo, ver el capítulo 2A en McCalpin, 2009). En este estudio resultó especialmente relevante el análisis paleosismológico porque permitió identificar eventos de ruptura (o de deformación plástica en función de la plasticidad de los materiales) relacionados con terremotos que alcanzan la superficie y por tanto pueden tener magnitudes superiores a 6.0, lo que implicaría más de 10 km de extensión lateral de la ruptura y ello indicaría la existencia de fallas de al menos decenas de kilómetros de longitud, o si son de menor longitud se encuentran tectónicamente conectadas. Esto es especialmente interesante en regiones con vegetación densa y con pocos afloramientos, como es el caso de Costa Rica. Por tanto, la investigación paleosismológica permite la observación de las fallas en su verdadera dimensión evitando que estas fallas se tiendan a interpretar como de pequeña longitud por falta de una adecuada documentación de las mismas. La otra aportación relevante en un estudio paleosismológico es tratar de datar la ocurrencia de paleosismos, para lo cual es necesario realizar dataciones radiométricas. Esto se logró parcialmente porque, aunque se identificaron varios paleosismos, estos no pudieron ser restringidos temporalmente en forma adecuada, dado que no se pudo determinar la edad máxima de los depósitos no deformados.

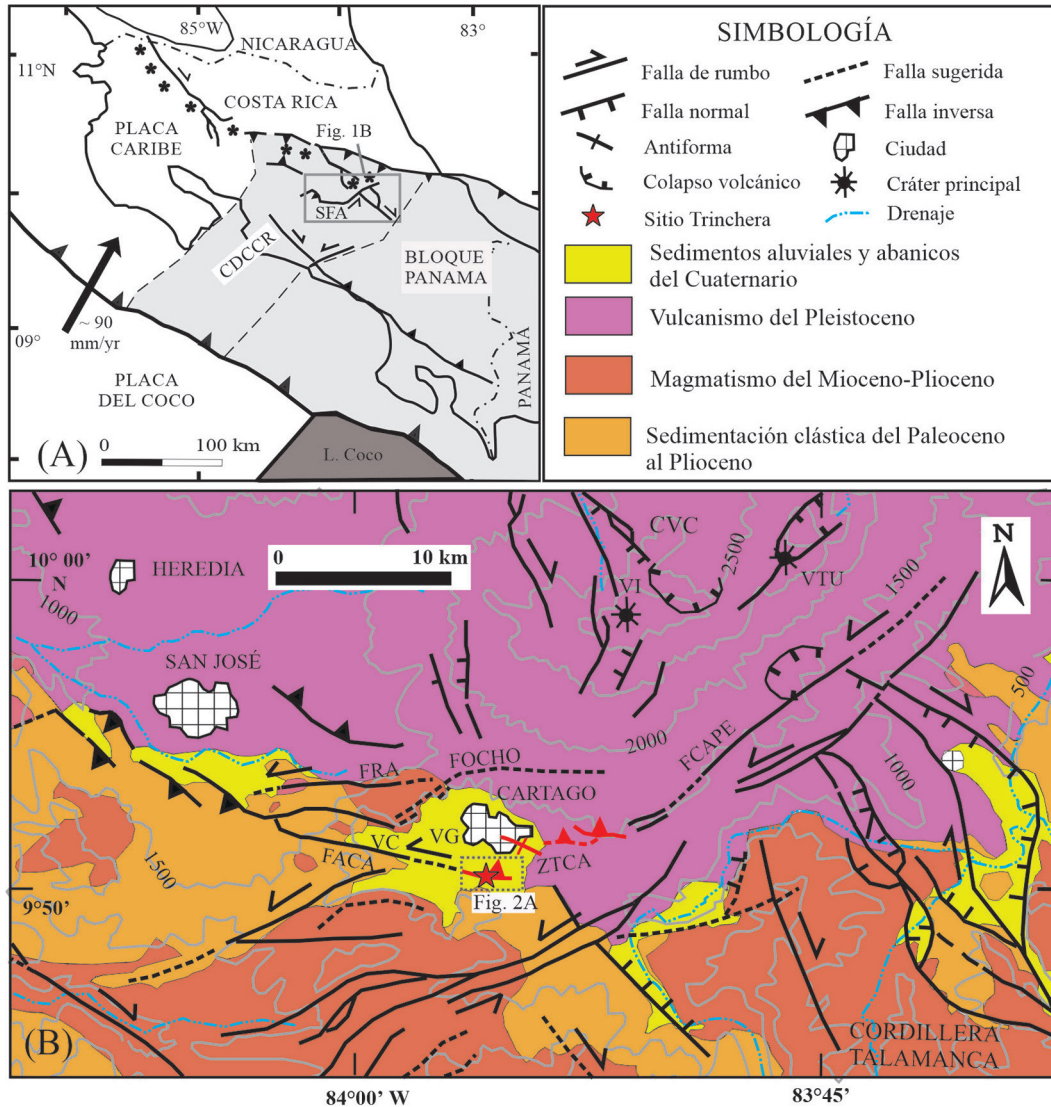


Fig. 1: (A) Contexto tectónico regional, donde se muestran las principales placas y bloques tectónicos de Costa Rica y zonas vecinas. Se ubica el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), delimitado por las líneas finas negras a trazos en el sector oeste del bloque de Panamá (zona en gris claro). Dentro del CDCCR se muestra el Sistema de falla Aguacaliente (SFA). También se muestra el levantamiento del Coco (gris oscuro), el cual es transportado al noreste por la placa del Coco e interactúa con el sur de Costa Rica. La flecha rellena en negro muestra la velocidad relativa entre las placas del Coco y Caribe. El rectángulo gris muestra el área que cubre la Fig. 1B. (B) Muestra la geología y la estructura tectónica en los alrededores de la Zona Transpresiva de Cartago (ZTCA), la cual incluye fallas inversas y pliegues anticlinales (en color rojo). La ZTCA fue asociada por Montero et al. (2013b) con una transpresión entre las fallas Aguacaliente (FACA) y Capellades (FCAPE). Además, se muestran las fallas Río Azul (FRA) y Ochomogo (FOCHO) del Sistema de Falla Aguacaliente. VG y VC son respectivamente los valles de El Guarco y de Coris. El rectángulo gris ubica la figura 2A.

LA ZONA TRANSPRESIVA DE CARTAGO (ZTCA)

La ZTCA fue descrita inicialmente por Montero et al. (2013b) (Fig. 1B). Morfológicamente la misma incluye escarpes de falla o de flexura de rumbo cercano al E-W y facetados al sur y anticlinales con traza axial de rumbo WNW, posiblemente relacionadas con fallas inversas ciegas en el sustrato (Figs. 1B y 2). La ZTCA se localiza entre el sur y el noreste de la ciudad de Cartago y afecta abanicos laháricos sobre los cuales se asienta gran parte de la ciudad y poblados cercanos. Asimismo, deforma depósitos volcánicos localizados sobre la falda sur del volcán Irazú, al norte de las ciudades de Cartago y Paraíso (Fig. 1B; Montero et al., 2013b).

Morfología y geología del sector sur de la ZTCA

El sector sur de la ZTCA y en específico la falla Cocorí se expresa mediante tres lomas alargadas de un rumbo cercano al N80°W (L1, L2 y L3 en Fig. 2A), que pierden expresión morfológica hacia el oeste y el este. El lado sur de estas lomas alargadas muestra un escarpe facetado al sur, con una altura máxima de unos 20 m. Como se verá en el modelo neotectónico, este escarpe se asocia con un escarpe de flexura, asociado con un pliegue por flexión de falla. La falla que se ubica al pie del escarpe se le denomina falla Cocorí (Fig. 2B). La longitud de la falla medida a lo largo del pie del escarpe es de 1,9 km. Sin embargo, este es un valor mínimo de longitud, dado que la falla debe estar cubierta tanto hacia el oeste como al este. Además, siendo una falla activa, como se verá adelante, debe estar creciendo lateralmente, por lo que su morfología se atenúa hacia el oeste y el este. Entre las lomas central y este (L2 y L3), la quebrada Cangrejal fluye dentro de un valle encajado (Montero y Kruse, 2006). Al sur de las lomas, la quebrada Cangrejal cambia su curso al este por unos 50 m, sugiriendo un desvío izquierdo (Sitio 1 en Fig. 2A). Las lomas alargadas se localizan en la parte sur de los abanicos laháricos distales, que cubren gran parte de la zona sur de la ciudad de Cartago (Fig. 1B; Montero et al., 2013b). Los anteriores depósitos serían los más antiguos que afloran en esta zona (Quintanilla et al., 2008; Montero et al., 2013b), y tendrían una edad del Pleistoceno Superior.

ESTUDIOS DE TRINCHERAS EN EL SITIO COCORÍ

La falla Cocorí fue estudiada mediante tres investigaciones de trincheras realizadas en los años 1991, 2009 y 2016 en el sitio Cocorí, que cubren un espacio de tiempo de 25 años (Fig. 2; ver cuadro 1). La zona seleccionada para el estudio de trincheras es donde las lomas alargadas L1 al L3 alcanzan su máxima altura (Fig. 2A) y por tanto, debería corresponder con la zona donde la falla tiene su máximo desplazamiento. En este trabajo se describen las trincheras de norte a sur y de oeste a este. Asimismo, se denominan en forma numérica y seguida las fallas y pliegues encontrados en las diversas trincheras.

Trincheras Tn1 y Tn2

La trinchera Tn1 (Fig. 2A) se abrió del lado norte de un arroyo sin nombre y su estratigrafía es idéntica a la de Tn2. Tn2 es la continuación al sur de Tn1 y se abrió del lado norte del escarpe entre las lomas L1 y L2 (Montero et al., 2009) (Fig. 2A). Su estratigrafía incluye un suelo orgánico A (véase detalles estratigráficos en la Fig. 3A), bajo el cual hay una arcilla gris (unidad Ia), que se dividió en dos unidades, siendo la superior plástica (unidad Ip), la cual transicionalmente pasa a una arcilla compacta (unidad Ic) (véase detalles estratigráficos en la Fig. 3A). Por debajo de la arcilla Ia se determinó un lahar con bloques volcánicos de andesitas a basaltos, algunos con diámetros métricos (unidad La; Fig. 3A). Localmente la meteorización del lahar origina una subcapa con bandas sub-horizontales rellenas de una arcilla gris de hasta 10 cm de espesor, lenticulares e irregulares que en algunos casos definen los bordes de fantasmas de clastos (unidad La1; Fig. 3A). El lahar muestra un nivel bastante sub-horizontales en los primeros 52 m de la trinchera (solo se muestra a partir del metro 40 en la Fig. 3A). Al sur del metro 52, el lahar levanta su altura entre los metros 68 y 85, donde desaparece la arcilla Ia (Fig. 3A). Otro alto topográfico del lahar aparece entre los metros 125 a 130 (Fig. 3A). Estructuralmente, es llamativo que alrededor de los 70 metros, las bandas de arcilla se muestran inclinadas con ángulos que varían entre unos 20° a 35° al norte (Figs. 3B y 3C), mientras que entre los metros 75 y 85, las mismas son sub-horizontales. Lo anterior podría sugerir una leve flexión del lahar. Una situación similar se presenta en el metro 120, donde hay nuevamente bandas inclinadas al norte, mientras que hacia el metro 130, las mismas no se observan.

Trincheras Ts1, Ts2 y Ts3

Las trincheras Ts1 y Ts3 tuvieron orientación perpendicular al escarpe de la loma alargada L2 (Fig. 2A), mientras que la trinchera Ts2 se ubicó al sur de L2 (Montero et al., 1991). La estratigrafía de la trinchera Ts1 muestra varias unidades del lahar (La) y un par de unidades de arcillas (Ia e Ir) (Fig. 4). Además, se determinaron las fallas F1 y F2. Entre ambas

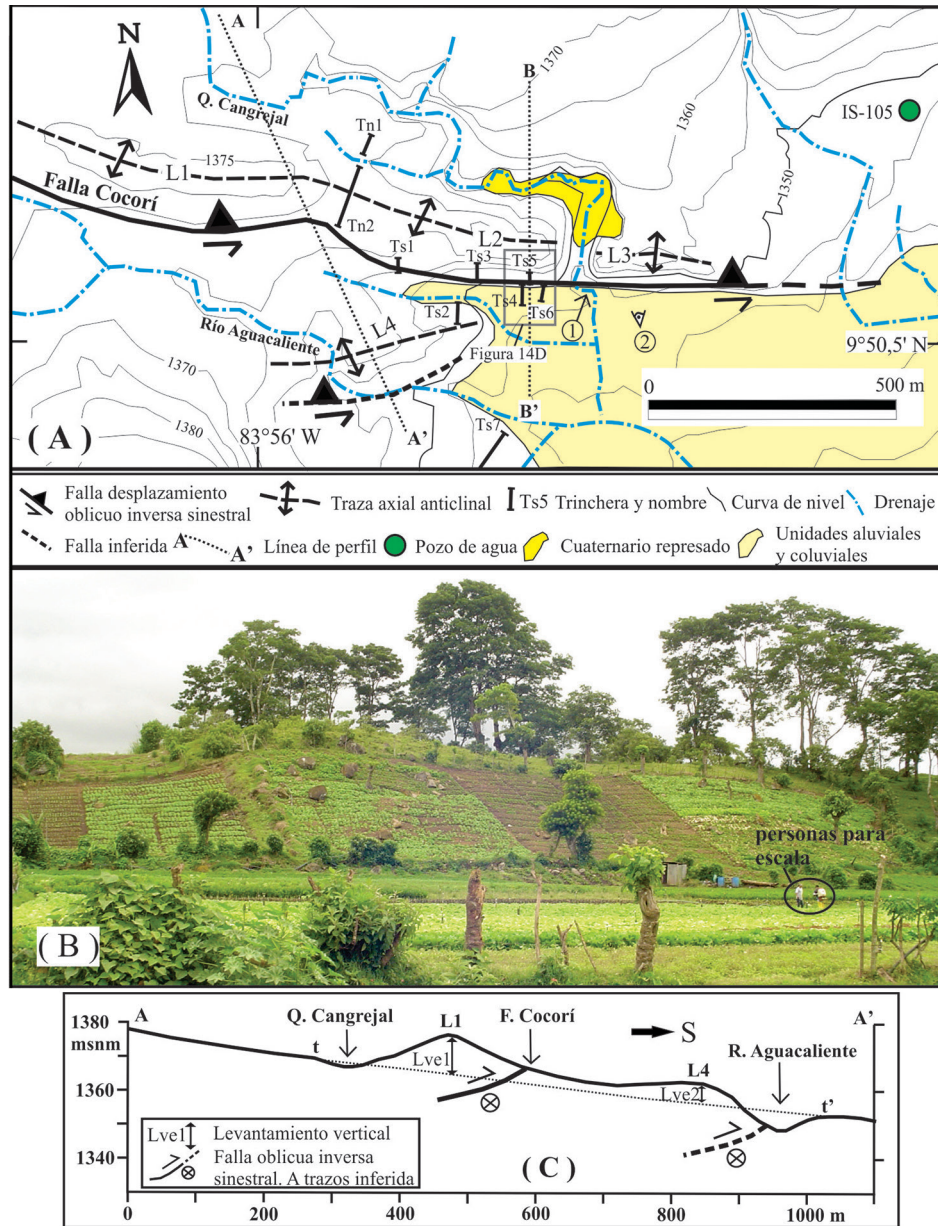


Fig. 2: (A) Muestra el sector sur de la zona transpresiva de Cartago. Las lomas alargadas L1, L2, L3 y L4 tienen escarpes facetados al sur, originados por dos pliegues por flexión de falla relacionados ambos con la falla Cocorí. La quebrada antecedente Cangrejal ha depositado terrazas aluviales aguas arriba de las lomas L2 y L3 (en color amarillo). Además, se muestra la ubicación de las trincheras realizadas en los años 1991 (Ts1, Ts2 y Ts3), 2009 (Tn1, Tn2 y Ts4) y 2016 (Ts5 y Ts6). Las curvas topográficas provienen de la hoja Tejar, escala 1: 10 000 del Instituto Geográfico Nacional (1991). La flecha al norte del sitio 1 muestra el desvío izquierdo de 50 m de la quebrada Cangrejal al salir del escarpe, mientras el sitio 2 con la representación de un ojo viendo al NNW, ubica el sitio desde donde se tomó la foto 2B. La línea de perfil AA' se muestra en la parte 2C, mientras que la línea de perfil BB' es el perfil geológico de la figura 15A. El rectángulo gris define ubicación de figura 14. (B) Fotografía viendo al NNW del escarpe facetado al sur de la loma alargada L3. (C) El perfil topográfico AA' identifica la falla oblicua inversa-sinistral que limita el sector sur de la loma alargada L1 y la falla sugerida inversa-sinistral que se ubicaría al sur de la loma L4, donde el valle del río Aguacaliente se muestra asimétrico. La línea a puntos t-t' es una tirante que muestra la pendiente regional de los abanicos laháricos distales, donde no son perturbados por la neotectónica, y los levantamientos tectónicos (Lve1 ≈ 12 m y Lve2 ≈ 8 m) asociados con los pliegues por flexión de falla descritos en el texto. Figura redibujada de Montero y Kruse (2006).

Cuadro 1

Trincheras de investigación realizadas en el sitio Cocorí o cerca del mismo

Nombre de trinchera	Ubicación (Lat. N, Long. W) rumbo y longitud	Ubicación geomorfológica	Referencia
Ts1	9,84171 - 83,92878 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N0°E Longitud 28 m	Pie del escarpe de la loma L2	Montero et al. (1991)
Ts2	9,84072 - 83,92771 (Cabecera trinchera - lado S) Rumbo N 10°E Longitud 52 m	Pie norte de loma baja ubicada al sur de la loma L2	Montero et al. (1991)
Ts3	9,84164 - 83,92732 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N 0°E Longitud 24 m	Pie del escarpe de la loma L2	Montero et al. (1991)
Tn1	9,84393 - 83,92927 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N 20°E Longitud 28 m	Loma baja entre la quebrada Cangrejal y quebrada sin nombre	Montero et al. (2009)
Tn2	9,84345 - 83,92939 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N 22°E Longitud 132 m	Lado norte de ensilladura entre las lomas L1 y L2	Montero et al. (2009)
Ts4	9,84124 - 83,92644 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N10°E Longitud 45 m	Lado sur del escarpe de la loma L2	Montero et al. (2009)
Ts5	9,84139 - 83,92637 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N0°E Longitud 11 m	Pie del escarpe de la loma L2	Este estudio
Ts6	9,84131 - 83,92607 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N0°E Longitud 40 m	Lado sur del escarpe de la loma L2. Trinchera sub-paralela a Ts4	Este estudio
Ts7	9,83997 - 83,92883 (Cabecera trinchera lado N) Rumbo N30°E Longitud 80 m	Lado sur del río Aguacaliente, en una zona de morfología con pendiente al noreste de unos 3°	Rojas y Montero (2006)

fallas se determinó un lahar (Nivel J) con bloques lávicos andesíticos lajeados y una matriz muy meteorizada. En el bloque del techo de F1 aflora un lahar gris verdoso a castaño, extremadamente meteorizado y con bloques lávicos de hasta 50 cm de diámetro (Nivel Lag), el cual es sobreyacido por una arcilla moteada muy plástica, rojiza y vacuolar (Nivel Ia) (Fig. 4). Las dos unidades de lahar sobrepuestas por la falla F1 en su parte inferior se muestran en la figura 5. La falla F1 tiene un buzamiento aparente de alrededor de 20° al N. En el lado sur de la trinchera se determinó la falla F2 (Fig. 4), la cual sobrecorre al lahar de la unidad J sobre una arcilla rojiza moteada gris a rojo, con bloques andesíticos esporádicos, con un diámetro máximo de 32 cm (Nivel Ir). La falla F2 se inclina 27° al N05°E y es oblicua dado que tiene estrías con un ángulo de rake de 49°, aunque no se determinaron indicadores cinemáticos. Una posible falla F3 con inclinación aparente al N, cortaría la unidad J entre los metros 15 a 20 (Fig. 4). La falla sobrepone un material lávico color lila (nivel JI) sobre una arcilla amarilla (nivel If). Asimismo, del lado del techo aflora el nivel sub-horizontal Lap (lahar arcilloso pardo) por debajo de la unidad J, la cual no se observa en el piso de la falla inferida. Las fallas F1, F2 y F3 se interpretan como fallas oblicuas inversas-sinistrales por: 1. Consideraciones geométricas (su bajo ángulo e inclinación al N, en dirección contraria al escarpe de la loma alargada L1). 2. Las fallas F1, F2 y F3 tienen las mismas características geométricas de las fallas F5 (en trinchera Ts4) y de la falla F8 (en trinchera Ts5), que como se verá adelante son oblicuas inversas-sinistrales y 3. En la falla F2, el lahar J sobrecorre la arcilla Ir (que se interpreta como una variación lateral de Ia) y de acuerdo con la estratigrafía determinada en las diversas trincheras, la arcilla Ia es más joven que el lahar.

La trinchera Ts2 se localizó unos 60 m al sur del escarpe (cuadro 1 y Fig. 2A). Su estratigrafía inicia con un suelo orgánico A, subyacente en los primeros 42,5 metros de la trinchera por la arcilla Iaa (Fig. 6A). Lateralmente, entre los metros 42,5 y 43, la interrumpe una arcilla rojiza plástica (unidad Ir). Al norte del metro 43, bajo el suelo aflora la unidad de arcilla Ic y bajo ésta el lahar La.

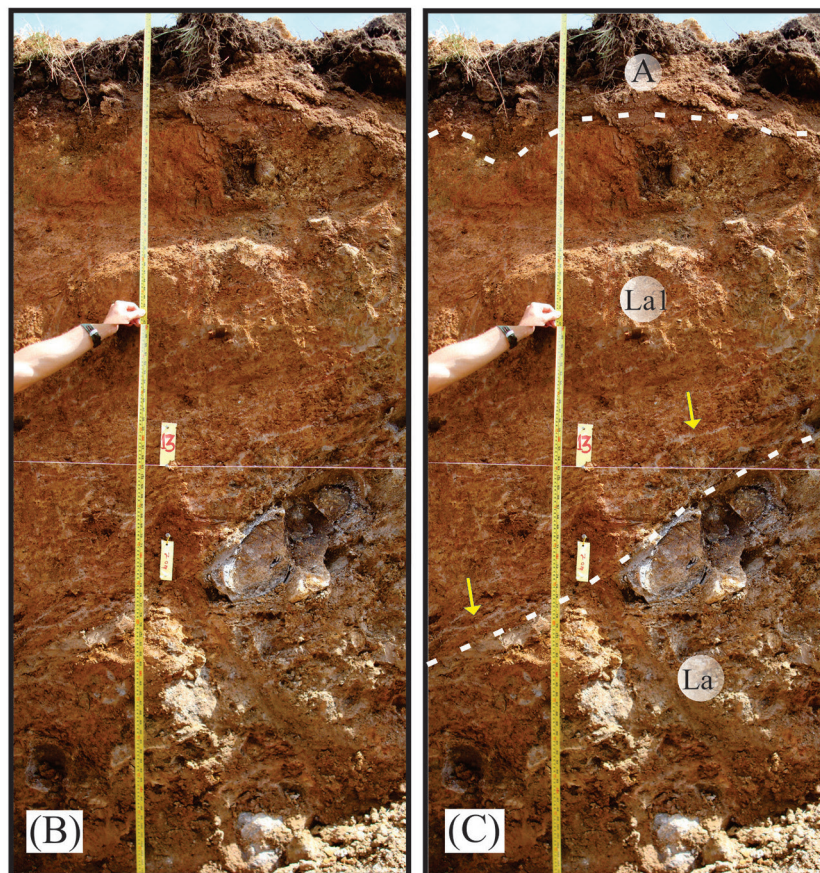
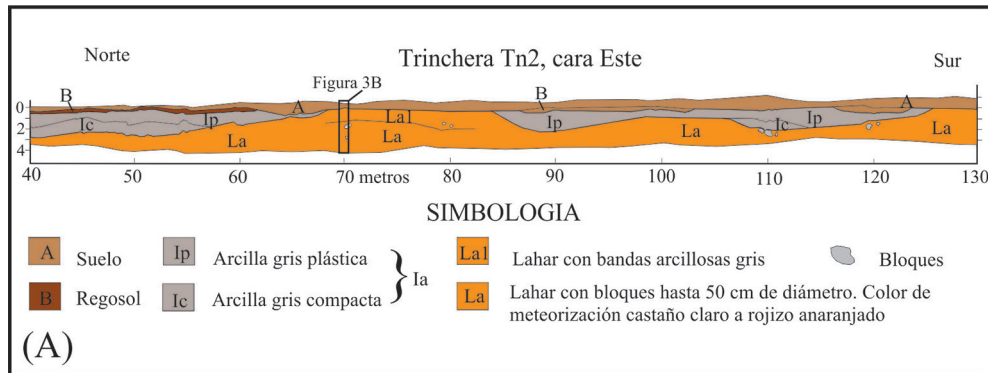


Fig. 3: (A) Perfil geológico de la cara este de la trinchera Tn2 (ubicación en cuadro 1 y Fig. 2A) entre los metros 40 y 130. El alto topográfico de La1 y La, entre los metros 65 y 85, coincide con la zona de cresta del pliegue de las figuras 2A, 15A y 15B. El rectángulo negro ubica la figura 3B. (B) Fotos sin interpretar de la columna estratigráfica número 13 levantada en el metro 70, donde ocurre un levantamiento topográfico del lahar. Observar que en esta zona se localiza la traza axial anticlinal (ver Fig. 2A). (C) Fotos interpretadas donde se observa que el suelo es subyacido por el lahar y no por la arcilla gris (unidad Ia). El lahar es dividido en las sub-unidades La1 y La, cuyo contacto lo define la línea blanca a trazos. La unidad La1 muestra bandas arcillosas con ángulos que varían entre unos 20° a 35° al norte (indicadas por flecha amarilla). La cuerda blanca marca el nivel horizontal.

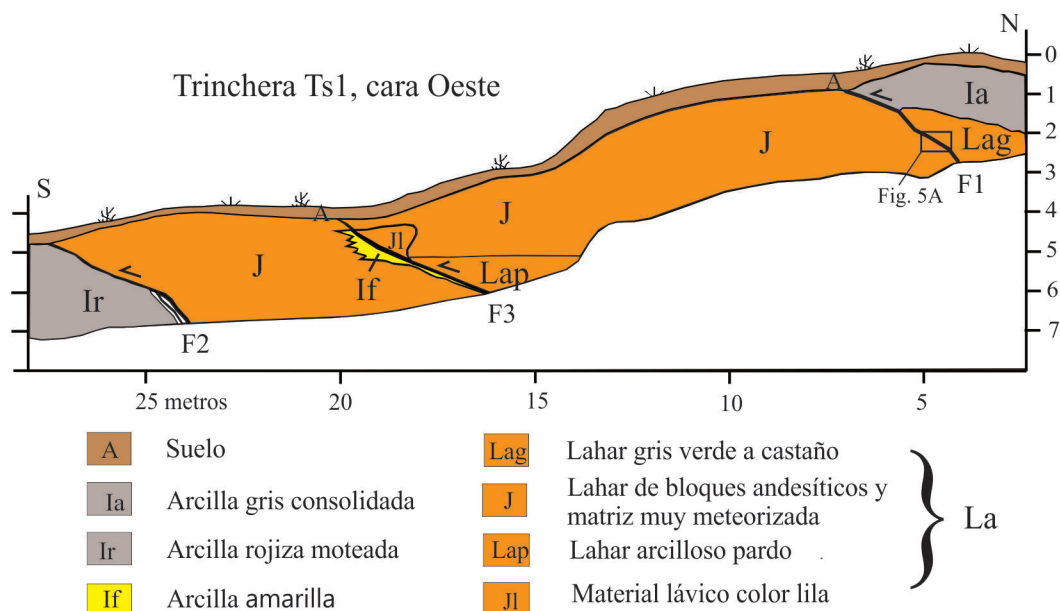


Fig. 4: Croquis de la cara oeste de la trincheras Ts1. El lahar La se subdivide en varias unidades. Se muestran las fallas F1 y F2, las cuales yuxtaponen unidades estratigráficas diferentes. Además, se infiere una falla F3. El rectángulo ubica la zona cubierta por la fotografía de la figura 5A.

Con respecto a la parte estructural, el lahar es atravesado por múltiples vetillas de arcilla gris. Algunas vetillas tienen hasta 2 cm de espesor, son bastante continuas y sugieren zonas de falla. Destaca en el metro 18, una zona de falla con vetas de arcilla elongadas verticalmente con un patrón *en échelon* (ver en Fig. 6A), que se interpreta son de origen tensional y que se pueden asociar con una cizalla de tipo normal (ver recuadro en Fig. 6A). Las vetillas se presentan en una zona de cambio de pendiente del lahar y de la arcilla Ia, lo cual se puede interpretar como una zona axial anticlinal (línea a puntos en Fig. 6A). El segundo aspecto estructural que destaca es la zona de falla F4, ubicada entre los metros 28 y 32, con una inclinación aparente de unos 30° al S (Figs. 6A y 6B) (Montero et al., 1991). Esta zona de falla se caracteriza por una veta gris continua de un espesor de unos 2 cm (ver en figura Fig. 6A) y bajo la misma se observaron estrías de falla en las vetillas de arcilla, muchas de ellas inclinadas de forma similar a la falla F4 (Fig. 6B). Asimismo, varios bloques del lahar La muestran una capa externa de arcilla gris y están deformados con el eje largo sub-paralelo a la zona de falla de F4. Un aspecto estructural diferente de esta trincheras es que la falla inclina al sur, en forma contraria de como inclinan las fallas interpretadas en la zanja Ts1 y como veremos también en las trincheras Ts4, Ts5 y Ts6.

La trincheras Ts3 no proporcionó datos estratigráficos ni estructurales relevantes. Sin embargo, se identificó dentro de la arcilla Ia, un fragmento cerámico de la fase Cartago, ubicada entre 1000 a 1500 años DC (según Arqueóloga Floria Arrea, comunicación verbal, 1991; en Montero et al., 1991). Lo anterior indica que la ocupación humana en el sitio Cocorí ya estaba presente en este tiempo. Esto lo confirman diversos estudios arqueológicos realizados en esta zona, donde hubo un importante asentamiento indígena denominado Agua Caliente, con un modo de vida cacical (p. e. Peytrequín y Aguilar, 2007).

Trincheras Ts4

La trincheras Ts4, se realizó unos 10 m al sur del pie del escarpe de la loma alargada L2 (Fig. 2A), en una zona suavemente inclinada al sur (Fig. 2A). Se definieron catorce unidades cubiertas por un suelo orgánico tipo A, que incluyen como sustrato al techo del lahar La (Fig. 7) (Montero et al., 2009). En la estratigrafía destaca la discontinuidad (T. Aguilar, comunicación verbal febrero 2020) entre la unidad Pao y las unidades subyacentes, las cuales están plegadas (Fig. 7). Con base en las dataciones

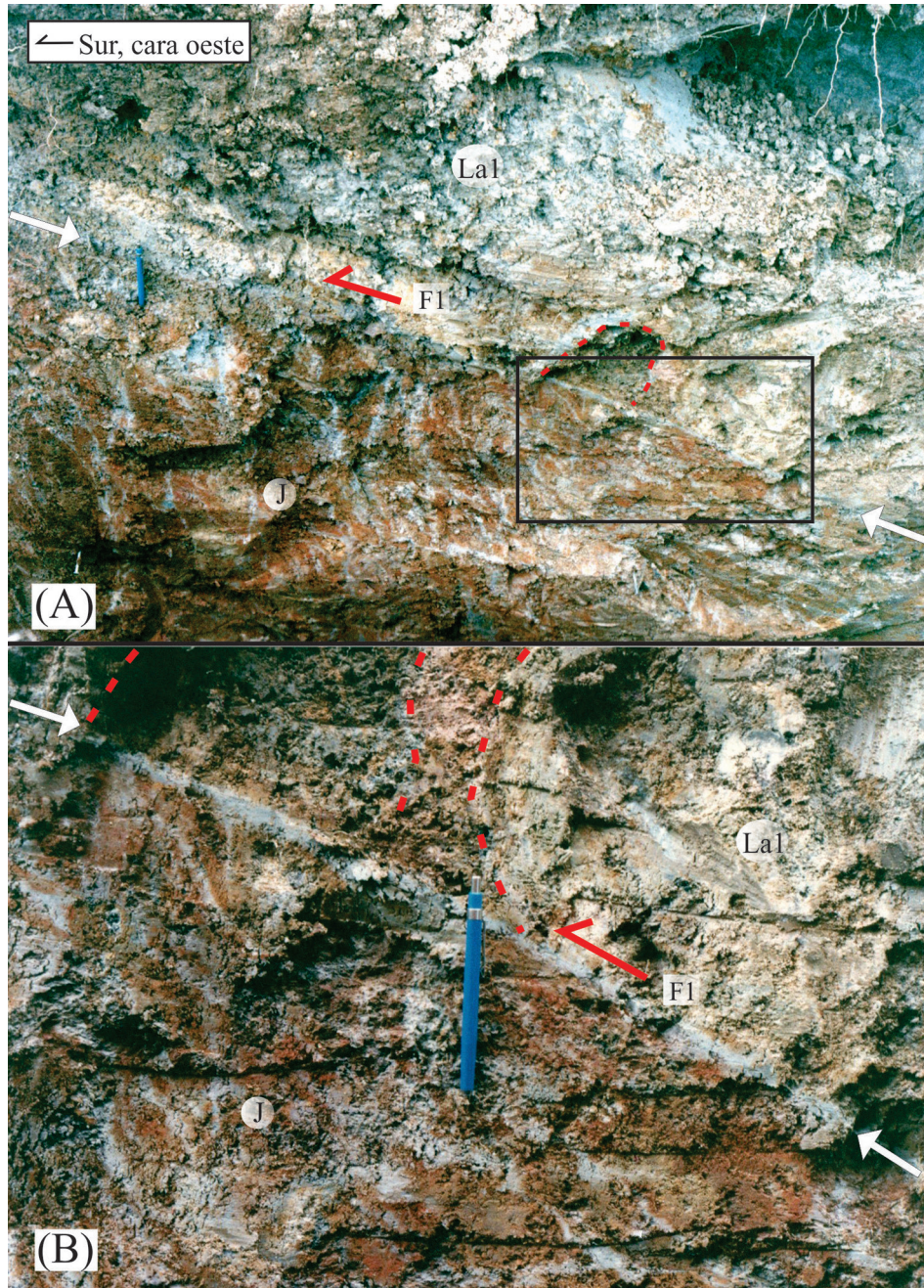


Fig. 5: (A) Fotografía del contacto entre las unidades de lahar Lag y J yuxtapuestas por la falla F1 (Ubicación en figura 4). Las flechas rellenas en blanco muestran el trazo de la falla principal, rellena por una arcilla gris claro, la cual tiene un ángulo aparente de unos 20° al norte. Una línea a trazos rojos muestra una subunidad gris en el bloque del techo cortada por la falla. En el bloque del piso se muestra un patrón de fracturas de una inclinación de unos 60° al N y otras sub-paralelas a la falla. El rectángulo de trazo negro muestra la zona detallada en la foto 5B. (B) Foto muestra un detalle de la zona de deformación aledaña a la falla F1, indicada por la flecha rellena en blanco, mostrando vetillas rellenas con arcilla con las orientaciones indicadas en 5A. Las líneas a trazos rojos en el bloque del techo muestran capas delgadas de diferentes colores, que terminan con una posición sub-vertical contra la superficie de falla.

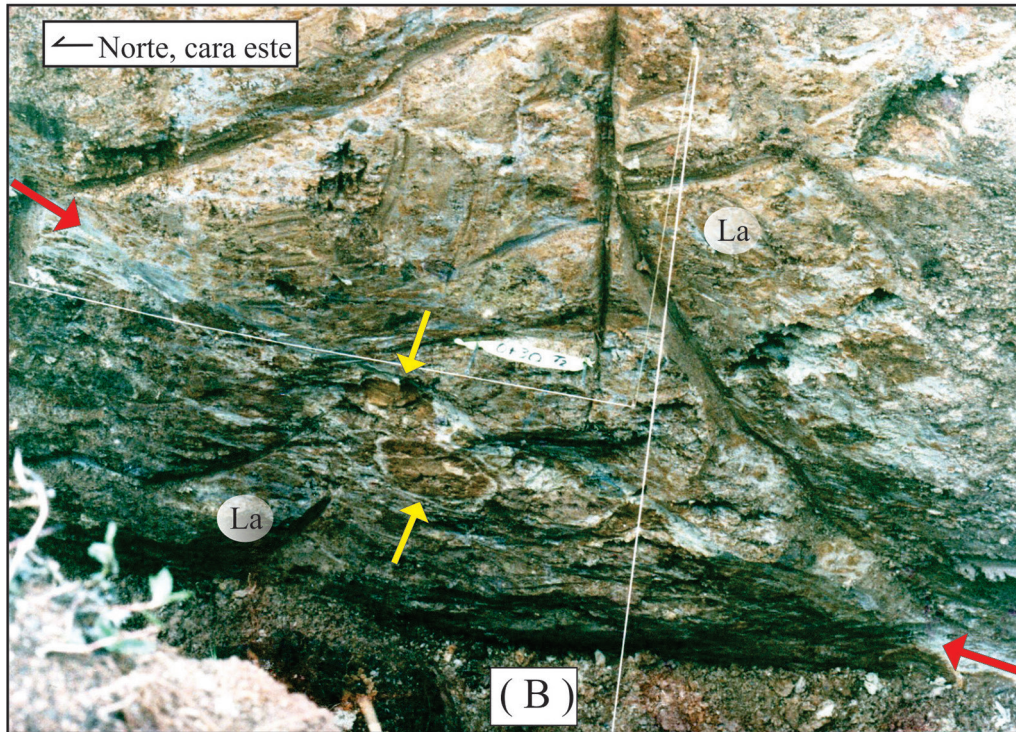
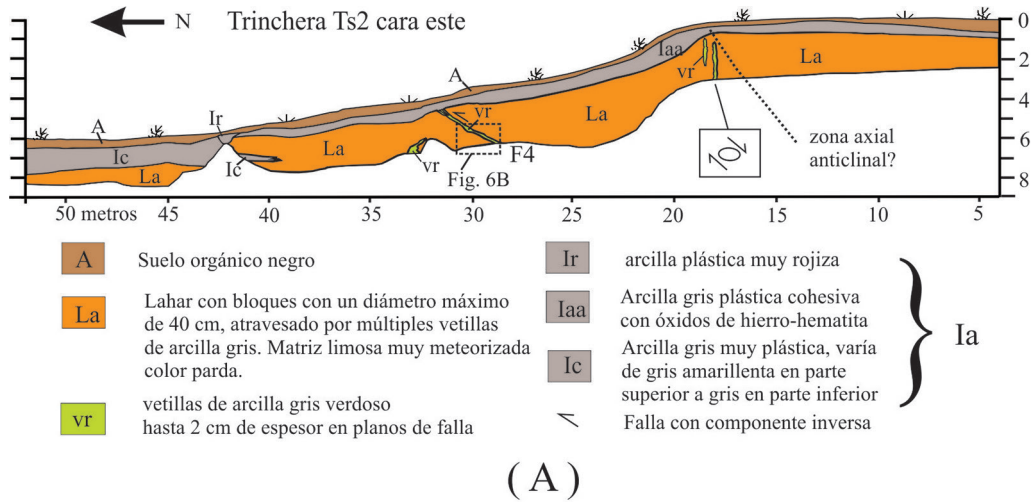


Fig. 6: (A) Croquis de la cara este de la trinchera Ts2 del sitio Cocorí. La falla F4, inclina al sur, en forma contraria a lo observado en las trincheras Ts1, Ts4 y Ts5, se muestra cerca del metro 30. Obsérvese el cambio de inclinación del contacto lahar (La)-arcilla (Ia) cerca del metro 18, a lo largo de lo que se sugiere es una traza axial anticlinal y un patrón en escalera de grietas tensionales, que se relacionan con una cizalla normal (ver interpretación en recuadro). (B) Foto de la cara este de la trinchera Ts2, alrededor del metro 30. Se muestra con flechas rojas una veta continua rellena de arcilla gris, que se interpreta es la falla F4 cortando el lahar La. Debajo de la misma, se observan otras vetas con posición sub-paralela y bloques del lahar, con el eje largo orientado también sub-paralelo a la falla interpretada, dos de los cuales son indicados por flechas amarillas. Ubicación de foto en figura 6A.

mostradas en el cuadro 2, esta discontinuidad es más joven que unos 8000 años desde el presente (edad más reciente para la unidad Imo). Sin embargo, como se observa en la cara este de la trinchera Ts4, sobre la unidad Imo están las unidades Fgr y Fca, por lo que esa discontinuidad podría ser bastante más reciente que 8000 años antes del presente.

La trinchera Ts4 muestra evidencia de tres fallas y varios pliegues (Fig. 7; Montero et al., 2009). En la cara este entre los metros 5 a 8 (Figs. 7A y 8), la falla F5 sobrecorre la unidad Ia con respecto a las unidades Ia e Imo. Esta última unidad incluye numerosos bloques angulosos de lava, desprendidos del escarpe de la loma L2 (Fig. 2A), especialmente presentes en la base de la unidad (Figura 8). La falla F5 se inclina 20° al N20°W y tiene una separación de inclinación de 1,8 metros. Por otro lado, en la cara oeste entre los metros 6,5 a 8, la misma falla con componente inversa F5 sobrecorre la unidad Ia sobre las unidades aluviales comprendidas entre Pc e Ios (Fig. 7B). Asimismo, la unidad Ia se sugiere levemente plegada teniendo en su núcleo al lahar La (A1 en Fig. 7B).

Más al sur, continuando en la cara este, entre los metros 15 y 18 se infiere un sinclinal S1 y un anticlinal A2 vergente al sur, cuyo flanco trasero se inclina unos 30° al norte mientras que el flanco delantero está inclinado al sur entre 70° y 90° (Figs. 7A y 9). La zona de cresta de este pliegue fue erosionada antes de que se depositara en discordancia angular la unidad Pao. El pliegue A2 deforma a las unidades Imo, Ib, Fgr y Fca. Las unidades Ia e Imo de este pliegue, se infieren cortadas por la falla F6 que tiene dos ramales, ambas con una posición sub-horizontal. En el sinclinal adyacente S2, la unidad Fgr muestra fracturas rellenas por material proveniente de la unidad inferior Imo, con granulometría arenácea (Fig. 9), lo cual se explica por extensión en la zona de charnela sinclinal. Finalmente, entre los metros 20 y 26, se observa el anticlinal vergente al sur A3, el cual deforma las unidades Ia, Imo, Faa y Fgr (Fig. 7A). Esta estructura tendría un flanco trasero de suave inclinación al norte y un flanco delantero sur, donde las capas Ib y Faa se muestran con una posición sub-vertical. Este pliegue tiene su cresta cerca del metro 23. Se infiere una falla inversa F7 de bajo ángulo buzante al norte en la base de este pliegue (Fig. 7A). Entre los metros 30 y 45 de esta trinchera (no se muestran en la figura 7) no se determinaron estructuras tectónicas, por lo que el frente de fallamiento inverso en esta trinchera termina al sur cerca del metro 30.

Trincheras Ts5 y Ts6

La trinchera Ts5 cortó el pie del escarpe de la loma alargada L2 (Fig. 2A) y se puede considerar como la continuación al norte de la trinchera Ts4. La estratigrafía de la cara este de la trinchera permitió definir 15 unidades cubiertas por un suelo orgánico A (Figs. 10 y 11). Las diversas capas, excepto el suelo, son desplazadas por la falla F8, la cual tiene componente inversa y de rumbo, posiblemente izquierda. En el bloque del techo de la falla F8, bajo el suelo se identificaron dos coluvios Ca y la unidad Ia, que incorpora fragmentos aislados de hasta 3-4 mm de diámetro. Ligeramente arriba de la falla F8, se obtuvo una datación calibrada dos desviaciones estándar antes del presente ($Cal\ 2\sigma\ AP$) para la unidad Ia, entre 27685 y 27620 años AP (Cuadro 2). La unidad Ia es subyacida por el lahar La y bajo éste se definió la unidad M en los primeros 5 metros de la trinchera. Las tres anteriores unidades se sugieren levemente plegadas dado que los contactos entre ellas son sub-horizontales en los primeros 4 metros, pero entre los metros 4 y 6 tienen inclinación de unos 25° al S (Fig. 10). La unidad M recubre a lo largo de una discontinuidad a las unidades N, M1, H1 y H2, dado que estas tienen contactos entre sí en posición sub-vertical, que terminan abruptamente contra M. En la parte interna de H2, entre los metros 3 a 3,5, aflora H3, constituida por bloques de lava. El contacto entre ambas sugiere un anticlinal con el flanco delantero volcado. Por lo tanto, las unidades presentes debajo de la discontinuidad con M sugieren un plegamiento con una rotación mayor de las capas, que el observado en las unidades que sobreyacen a la discontinuidad (Fig. 10). Dos etapas de plegamiento son entonces reconocibles en el techo de la falla F8, ambas separadas por el contacto inferior de la unidad M.

En el bloque del piso de la falla F8, la estratigrafía difiere notoriamente con respecto a la del techo, lo cual implica que la falla tiene una componente de rumbo, posiblemente izquierda, además de la componente inversa (Fig. 10). La unidad Ia es arcillosa en su parte superior y pasa a ser arcillo-limosa hacia el piso, donde tiene un color ligeramente más claro. Además,

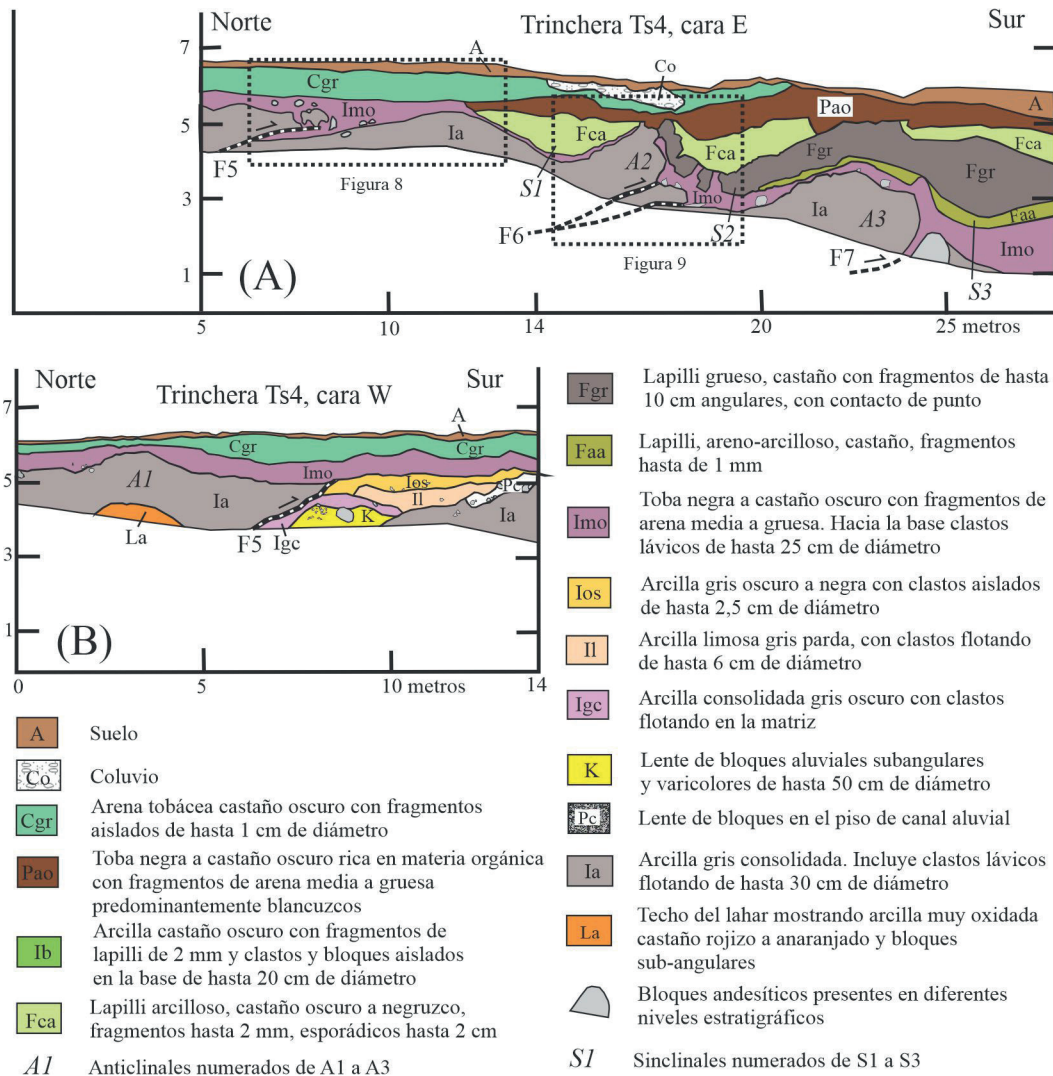


Fig. 7: (A) Croquis de la cara E de la trinchera Ts4 (Modificada a partir de Montero et al., 2009). La interpretación identificó la falla F5 y se infieren las fallas F6 y F7. La falla F5 sobrecorre la arcilla Ia más vieja con respecto a la unidad Imo, más joven. Además, se determinaron dos estructuras anticlinales (A2 y A3) y tres sinclinales (S1, S2 y S3). Los rectángulos a puntos muestran la ubicación de las figuras 8 y 9. (B) Croquis de la cara oeste entre los metros 0 a 14, invertido para comparación con la cara E. La interpretación identificó la falla F5, que aparece también en la cara este, con la cual se puede asociar el anticlinal A1. Obsérvese que la falla F5 sobrecorre la arcilla Ia sobre los depósitos de un paleocanal.

incluye varias pátinas de óxidos de hierro y los lentes Iaa e Iab, ambos similares, de color terracota, con una matriz limo-arcillosa y con fragmentos de lapilli de hasta 1 cm de diámetro, con regular selección. Ligeramente abajo de la falla F8, la unidad Ia fue datada entre Cal 2σ 24560 y 24195 años AP (Cuadro 2). Entre los metros 5 a 10, debajo de Ia aparece el lahar La. Por otro lado, entre los metros 1 a 5, la secuencia se inicia con la unidad H4, que tiene características similares a las unidades H1 y H2, determinadas en el techo de la falla F8. La unidad H4 es subyacida por la unidad GA, la cual a su vez es subyacida por Ia2, que es una arcilla que engloba clastos esporádicos de origen aluvial. Ia2 sobreyace a Qa2, de origen aluvial. La secuencia continúa con Ia1, una arcilla que incluye clastos aislados de origen aluvial y bajo ésta se determinó Qa1, una arena-grava, mal

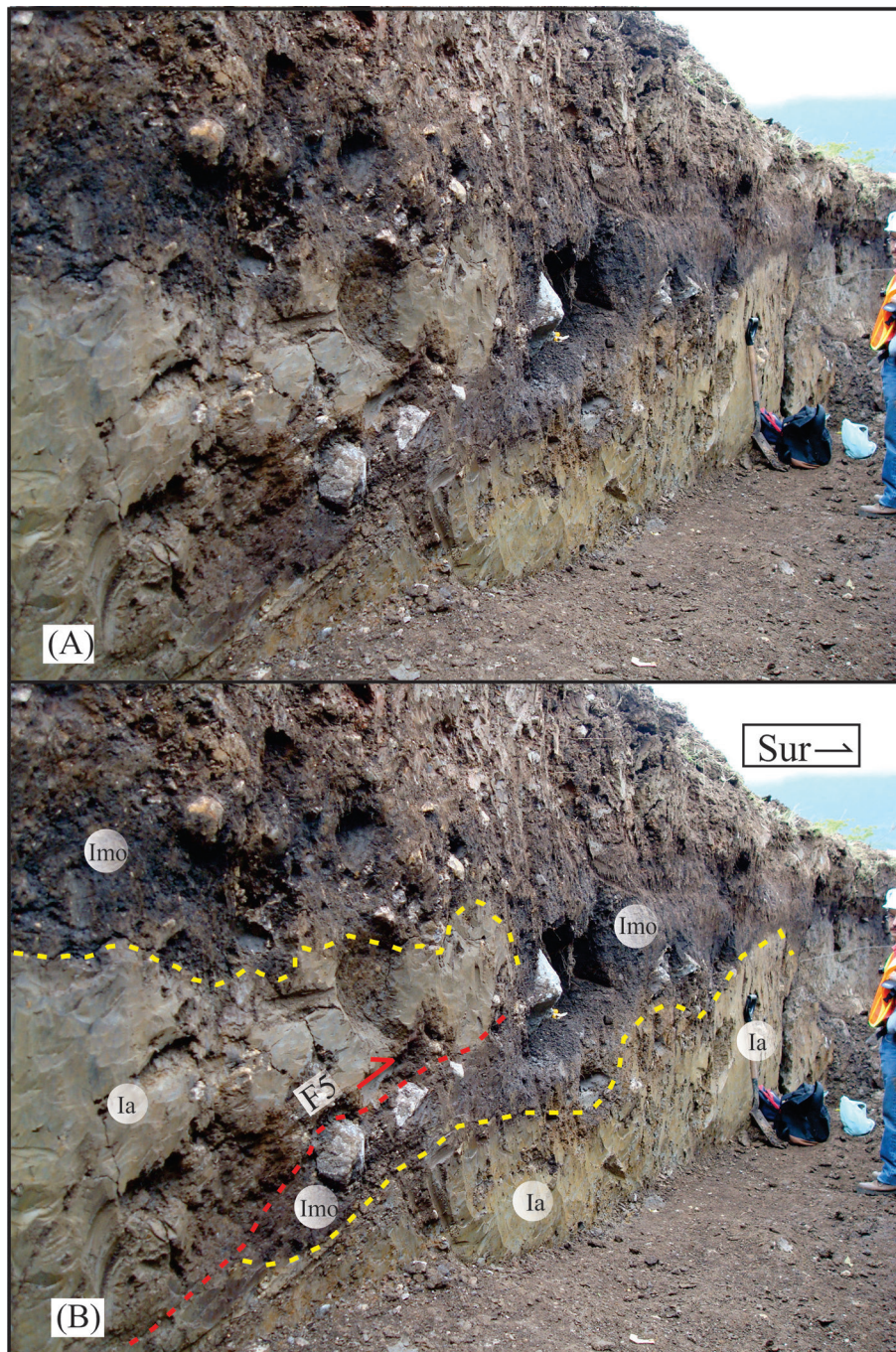


Fig. 8: (A) Foto sin interpretar de la cara este de la trinchera Ts4 entre los metros 5 a 12. Ubicación de foto en figura 7. (B) Foto interpretada mostrando la falla F5 (a trazos de color rojo) sobrecorriendo la unidad Ia, más vieja, con respecto a la unidad Imo, más joven. La separación de inclinación es de 1,8 metros. El contacto entre las unidades Ia e Imo se muestra a trazos amarillos.

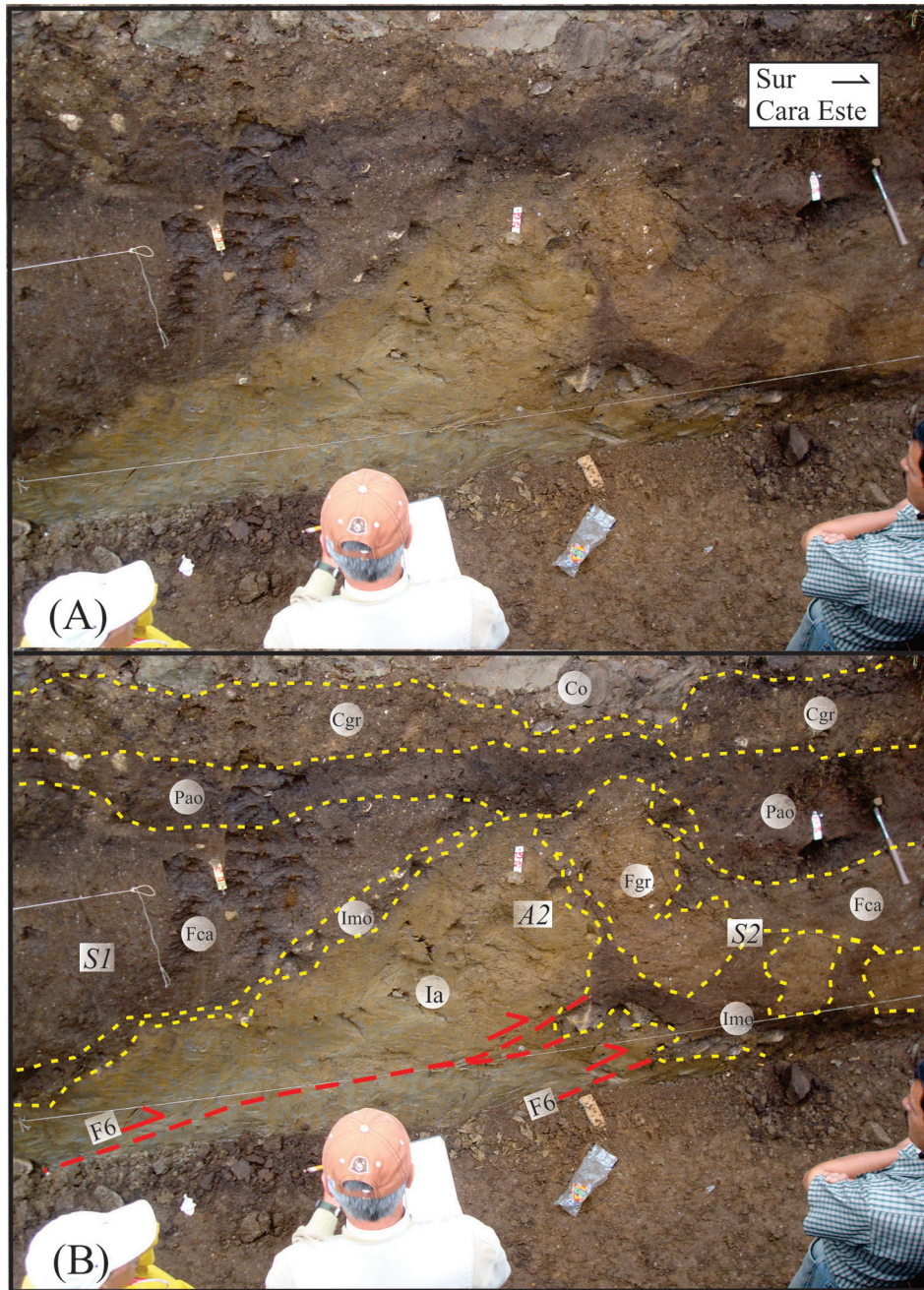


Fig. 9: (A) Foto sin interpretar de la cara este de la trinchera Ts4, entre los metros 14 a 19. (B) Foto interpretada mostrando el anticlinal A2 cuyo núcleo es Ia, con vergencia al sur, caracterizado por un flanco trasero inclinado 27° al norte y el delantero sub-vertical y la falla inferida F6 con dos ramas ubicadas en la base del flanco delantero. Las capas Ia, Imo, Fgr y Fca son deformadas por este plegamiento. Al norte del anticlinal A2 se define el sinclinal S1. Al sur del pliegue A2 se definió el sinclinal S2, en cuyo núcleo hay inyección del material arenáceo de la capa Imo dentro de la capa Fgr, debido a la extensión en la charnela sinclinal relacionada con el plegamiento. Obsérvese la presencia de clastos volcánicos en la base de Imo.

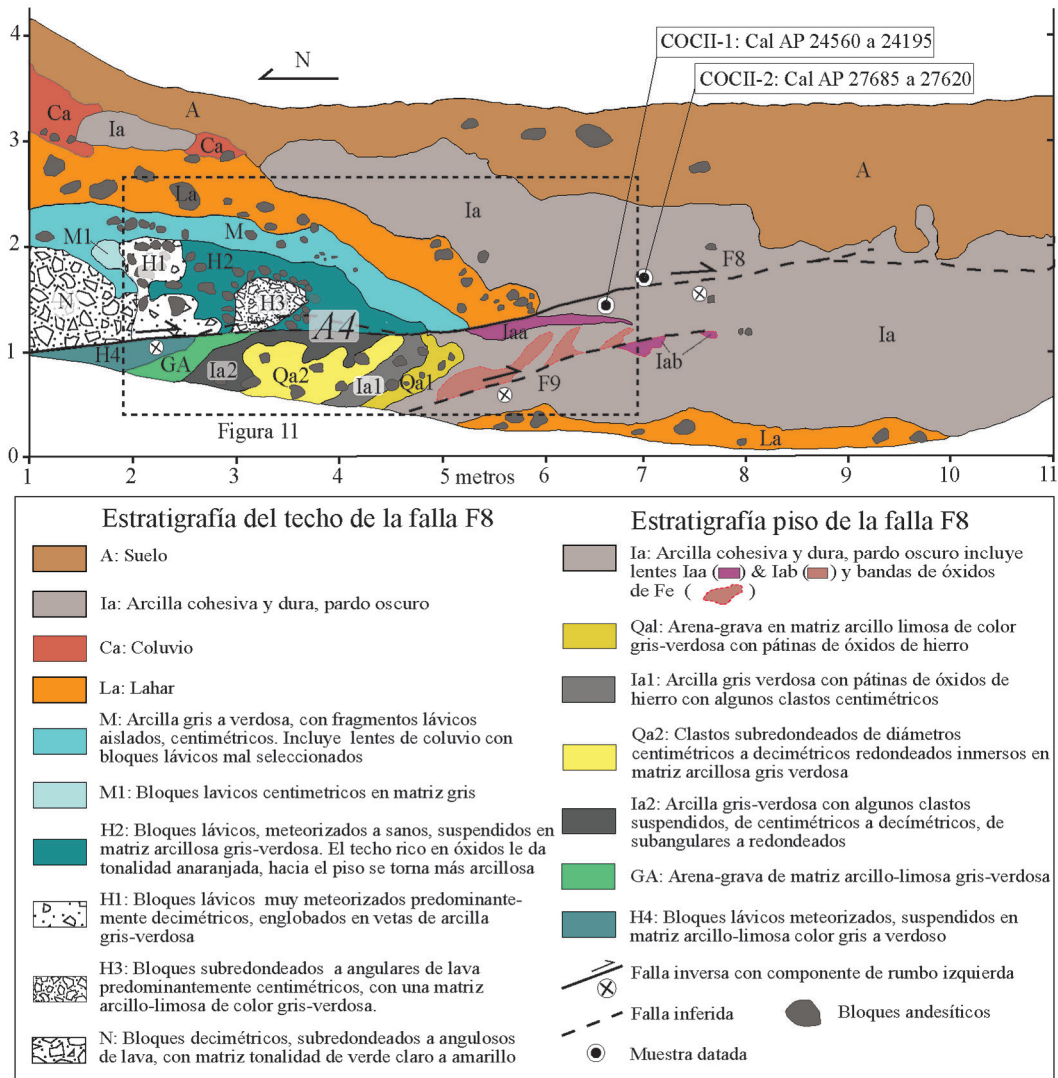


Fig. 10: Croquis de la cara este de la trinchera Ts5. Se interpreta la falla oblicua inversa-sinistral F8 de bajo ángulo, sobrecorriendo y desplazando a las diversas unidades estratigráficas identificadas excepto el suelo. F8 pone en contacto unidades estratigráficas contrapuestas en el techo y el piso. La falla F8 corta a través de la zona axial del pliegue volcado A4. F8 tiene una separación de inclinación de 88 cm. Una falla sugerida F9, sub-paralela a F8, sobrecorre el flanco volcado del pliegue A4 con respecto a la arcilla Ia y el lahar La.

seleccionada, fragmentos sub-angulares a redondeados, que se interpretan son de origen aluvial. Esta última unidad limita con la unidad Ia. Se considera que la secuencia H4 a Qa1 está en posición volcada, siendo H4 la unidad de mayor edad y Qa1 la más joven. Lo anterior se justifica por varias razones. En primer lugar, los contactos están inclinados unos 30° norte, en dirección contraria a la pendiente. En segundo lugar, H4 tiene una gran similitud con H1 y H2 y GA tiene similitud con H3. Por lo

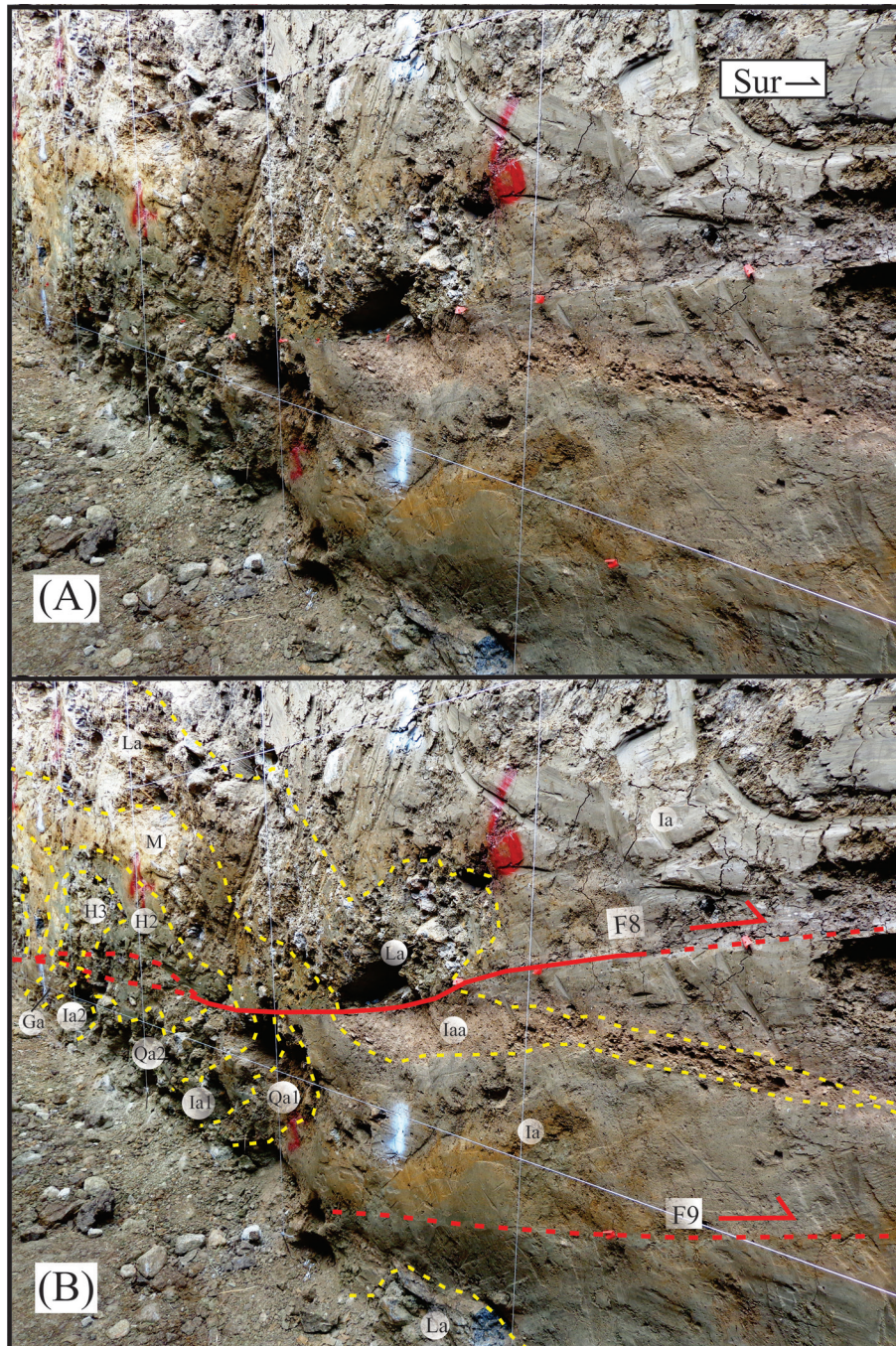


Fig. 11: (A) Foto oblicua sin interpretar de la cara este de la trinchera Ts5 entre los metros 2 a 7. (B) Foto oblicua interpretada mostrando las diversas unidades estratigráficas identificadas en la figura 10 y las fallas oblicuas inversas-sinestrales de bajo ángulo F8 y F9. Obsérvese el contraste litológico a ambos lados de la falla F8 y como el lente Iaa en el bloque del piso es cortado por la falla y no aparece en el bloque del techo. Esto último indica una componente de rumbo en la falla F8, que se considera sinistral.

tanto, estas unidades deben tener una edad similar. Asimismo, Ia1 e Ia2 tienen similitud con Ia. Por lo tanto, se interpreta que bajo Ia se desarrolló un paleocanal, el cual tenía como sustrato a GA y H4. La secuencia H4-Qa1 siendo más vieja sobrecorre a lo largo de la falla F9 al lahar La, mientras que la unidad Ia es deformada pasivamente por la secuencia H4-Qa1.

Un análisis general de la estructura tectónica que se observa tanto en las unidades del techo y del piso de la falla F8 comprendidas a partir de La, sugieren un pliegue entre volcado a recumbente, que sería el pliegue A4 (Fig. 10). Asimismo, recordamos que este pliegue se desarrolló en dos etapas en el bloque del techo, ambas separadas por la discontinuidad presente bajo M. La falla F8 por su parte se originó contemporáneamente con el desarrollo del anterior pliegue. F8 tiene una separación de inclinación de 88 cm, determinada en el contacto entre las unidades Ia y La en el bloque del techo y de Ia con Qa1 en el bloque del piso (Figs. 10 y 11). La falla F8 se propaga al sur dentro de la unidad Ia hasta el metro 11, donde terminó la trinchera. Esta falla corta el lente Iaa, el cual aparece en el piso de la falla, pero no en el techo, lo cual confirma que la falla además de tener una componente inversa tiene una componente de rumbo, presumiblemente sinistral (Figs. 10 y 11). Asimismo, el lente Iaa está en posición normal rellenando un pequeño canal dentro de la unidad Ia. Por otro lado, la falla inferida F9, que se ubica en la base del flanco volcado, limita en el bloque del piso al lente Iab, localizado dentro de la unidad Ia.

La trinchera Ts6, se realizó al este y sub-paralela a la trinchera Ts4, en una zona de relleno aluvial localizado sobre la margen derecha de la quebrada Cangrejal y al sur del escarpe de la loma alargada L2 (Fig. 2A). La estratigrafía incluye nueve unidades (Fig. 12). La secuencia se inicia con un suelo tipo A, que incluye fragmentos volcánicos aislados, rodados desde el escarpe, con diámetros de hasta 30-40 cm. Por debajo del suelo se identificó a partir del metro 10, la unidad Cgr. En la parte superior de la unidad Cgr se localizaron dos canales aluviales en la cara este (unidades C1 alrededor del metro 22 y C2 alrededor del metro 30) (Fig. 12). Ambas cuñas tienen bloques bastante redondeados con diámetros hasta de 5 cm. El contacto de Cgr con la unidad inferior Cfm es sinuoso y transicional. Cfm aparece solo entre los metros 14 y 18. Bajando en la secuencia, aparece la unidad Imo subyaciendo a las unidades Cgr y Cfm (Fig. 12). Imo incluye clastos de lava con pátinas blancuzcas, de tamaños variables de hasta 60 cm de diámetro, la mayoría de los cuales se ubican en la base de la capa y fueron transportados o rodados desde el escarpe L2 o del depósito coluvial, Co-L, con el cual tiene un contacto transicional. Ejemplos de estos bloques ubicados en la base de Imo se pueden observar en la Figs. 8, 12C y 13. Co-L tiene un aspecto lenticular con mayor espesor cerca de la loma y desaparece cerca del metro 13. Incluye fragmentos de lava derivados del escarpe de la loma L2, inmersos en una matriz arcillosa-limosa, de color castaño claro. La secuencia continúa con la capa Ia, la cual subyace tanto al depósito Co-L como a Imo. Las unidades Ag1 y Ag2 fueron sedimentados en pequeños canales y son evidencia de erosión previa al depósito de Imo. En la base de la secuencia se determinó el lahar (unidad La), el cual aflora solo en los primeros 13,5 m.

La estratigrafía de la trinchera Ts6 muestra varias similitudes con la de la trinchera sub-paralela Ts4, ubicada unos 35 metros al oeste (comparar Figs. 7 y 12). En ambas se determinó la siguiente secuencia: la unidad Cgr sobreyace a Imo, la cual sobreyace a Ia, y esta última sobreyace al lahar La. También, ambas trincheras muestran cambios de espesor en la unidad Imo, lo cual se relaciona con el plegamiento subyacente y con el aumento de espesor de la cuenca hacia el sur. Por ejemplo, en Ts6, Imo es más delgada al norte entre los metros 10 y 23, mientras que al sur del metro 23 es más gruesa, mostrando varios cambios de espesor, siendo estos mayores en las zonas de valles relacionadas con las depresiones de la capa inferior Ia o menos gruesa en las zonas levantadas de la misma capa Ia, lo cual se relaciona con el plegamiento de Ia (Figs. 12 A y 12B). Es decir, se puede inferir que en la trinchera Ts6, la unidad Ia se encuentra deformada por tres pliegues vergentes al sur. El pliegue anticlinal A5 tendría su cresta cerca del metro 23, donde el flanco norte tiene un suave buzamiento al norte, observable entre los metros 22 a 23, mientras que el flanco sur tiene una inclinación de unos 40° al S (Figs. 12A y 13). Este flanco parece deformado por un par de posibles fallas, a lo largo de las cuales el depósito Imo sugiere ser arrastrado por ambas fallas. Un nuevo levantamiento de la arcilla Ia se presenta entre los metros 26 y 30, lo cual define el anticlinal A6 (Fig. 12B y 12C). Finalmente, cerca del metro 34 se define la zona de cresta del anticlinal A7, el cual tendría un flanco tendido unos 7° al norte y un flanco sur inclinado unos 40° al S (Fig. 12B). Además, en este pliegue se observa que una inyección angosta de la arcilla Ia penetra en forma sub-vertical a la unidad Imo. El origen de esta inyección se puede relacionar con una grieta, de origen tensional, en la zona crestal de este pliegue A7.

Se sugiere que cada una de las anteriores tres estructuras de deformación dúctil son subyacidas cada una, por una falla inversa de bajo ángulo buzante al norte, que cortarían el lahar. Además, dada la naturaleza dúctil de la unidad Imo, se infiere que

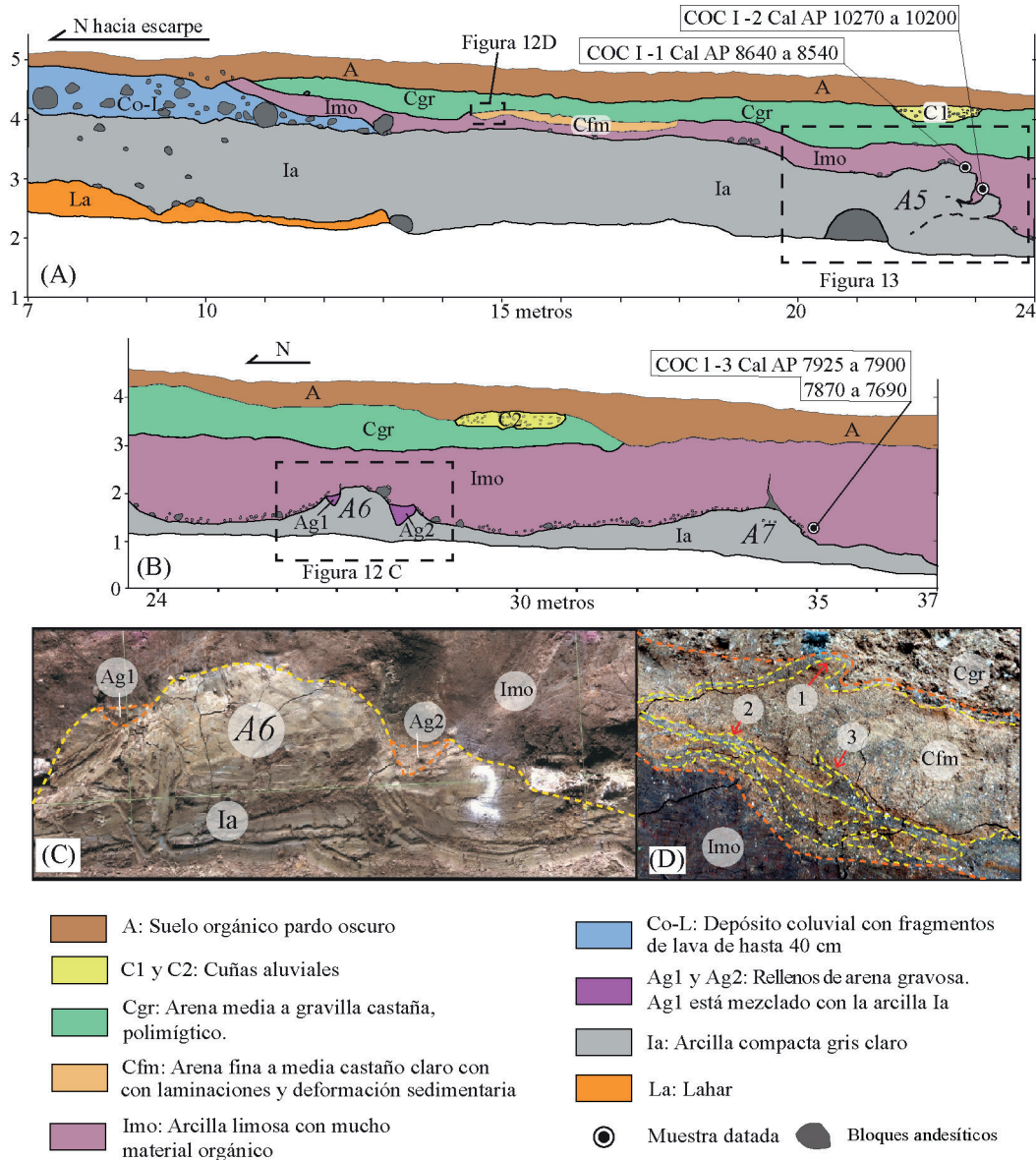


Fig. 12: (A) Croquis de la cara este de la trinchera Ts6 entre los metros 7 a 24. Entre los metros 20 a 24 se define el pliegue anticlinal A5, cuyo flanco delantero sugiere ser cortado por fallas. Se infiere que este pliegue es originado por una falla inversa subyacente inclinada al N. Rectángulos a trazos negros ubica las figuras 12D y 13. (B) Continuación del croquis de la cara este de la trinchera Ts6, entre los metros 24 a 37, en la cual identificaron las estructuras anticlinales A6 y A7. A6 tiene una zona crestral ubicada alrededor del metro 27,5 y A7 con zona de cresta alrededor del metro 34. Se infiere que ambos pliegues son originados por una falla inversa subyacente inclinada al N. Rectángulo a trazos negros ubica la figura 12C. (C) Foto entre los metros 26 a 29, del anticlinal A6 desarrollado dentro de la arcilla Ia. Obsérvese los diversos clastos de lava de color blancuzco presentes en la base de la unidad Imo. (D) Foto muestra evidencias de deformación sin-sedimentaria que se pueden relacionar con el paleosismo 3. El número 1 indicado por flecha roja señala un pliegue volcado vergente al S, desarrollado en una veta grisácea, que deforma el contacto entre Cfm y Cgr. El número 2 indicado por flecha roja, muestra un pliegue cuya convexidad disminuye hacia arriba tal como lo muestran dos bandas grisáceas y el contacto entre Imo y Cfm. El número 3 indicado por flecha roja señala una inyección de la banda grisácea dentro de las arenas finas a medias de Cfm.

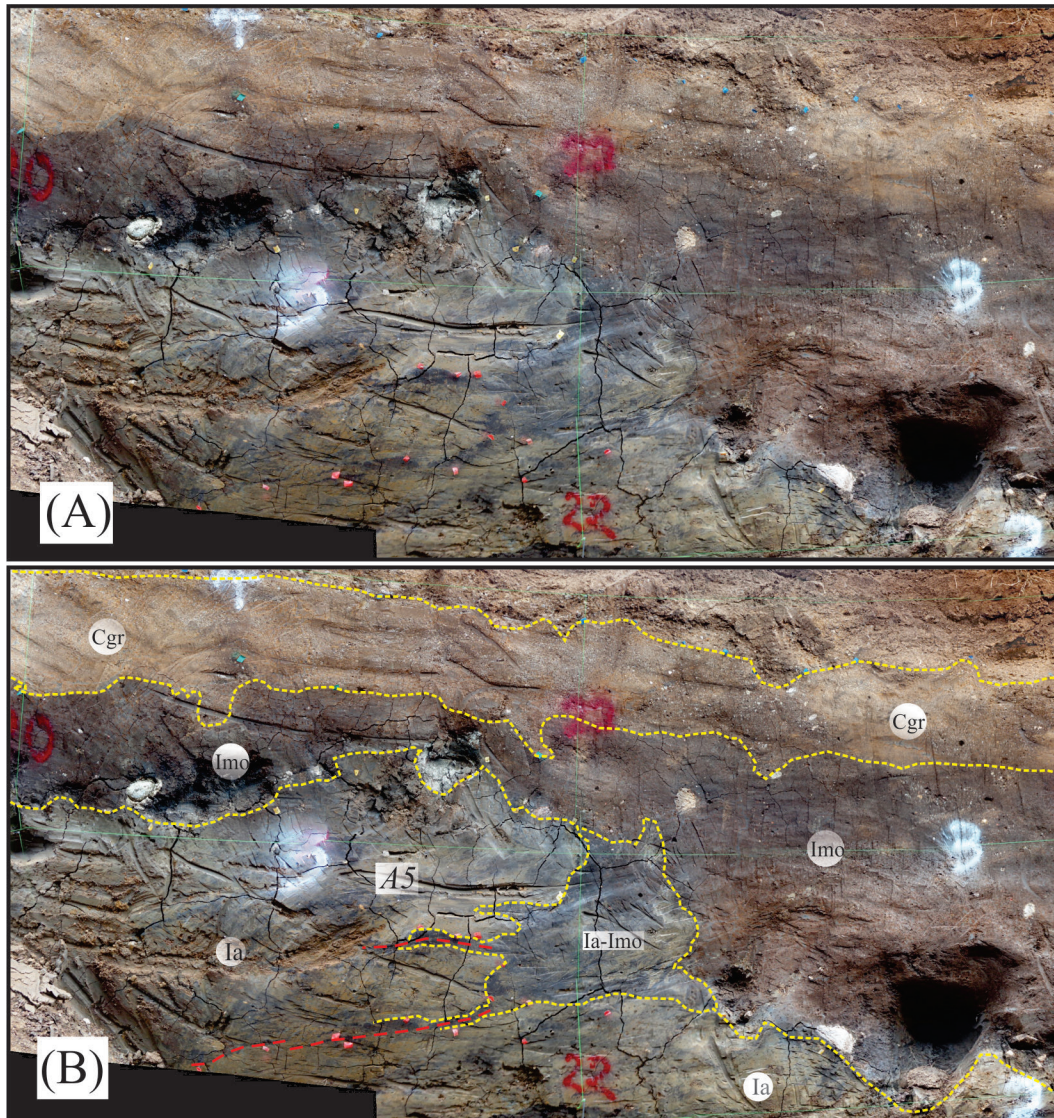


Fig. 13: (A) Foto sin interpretar entre los metros 20 a 24 del anticlinal A5 en la cara este de la trinchera Ts6.. (B) Foto interpretada mostrando las diferentes unidades identificadas y el pliegue A5. Obsérvese la leve inclinación al norte de la unidad Ia, de lo que sugiere corresponde con el flanco trasero del anticlinal A5, y el mayor espesor de la unidad Imo que rellena ese flanco en ese sector (alrededor del metro 21). Asimismo, alrededor del metro 22 (ver número 22 en color rojo) se identifica el flanco delantero del anticlinal con inclinación al sur. En ese flanco se observa una zona donde se mezclan las unidades Ia-Imo. Finalmente, una serie de clastos volcánicos mal seleccionados se identifican en la base de la unidad Imo, lo cual puede relacionarse con el paleosismo 2 (ver texto para discusión). Las trazas en rojo sugieren zonas de inyección de material enriquecido en materia orgánica a lo largo de zonas de deformación ubicadas dentro de Ia.

esta se deformó siguiendo en forma pasiva el plegamiento que afectó a la unidad Ia. Es decir, el desarrollo de los pliegues A5, A6 y A7 en la unidad Ia, ocurrió luego de la sedimentación de la unidad Imo, lo cual se evidencia además por la inyección de la arcilla Ia dentro de Imo en el metro 34 y la mezcla de Imo con la arcilla Ia, en el flanco delantero del anticlinal A5 (Fig. 13).

Trinchera Ts7

La trinchera Ts7 se realizó cerca del sitio Cocorí, del lado sur del río Aguacaliente, en una zona de pendiente sub-horizantal (Fig. 2A). El interés de esta trinchera para los fines de este estudio es que se determinó en la misma una estratigrafía muy similar a la encontrada en las trincheras Tn1 y Tn2. Efectivamente, se determinó que al suelo A, lo subyace una arcilla de características similares a Ia y bajo la misma se determinó un lahar similar a La. El contacto entre ambas unidades se inclina suavemente al sur. Sin embargo, desde el punto de vista estructural no se encontró ninguna evidencia de deformación frágil o dúctil en ninguna de las unidades mencionadas.

CONSIDERACIONES GENERALES CON RESPECTO AL SITIO DE TRINCHERAS COCORÍ

Evidencia de plegamiento en las trincheras Ts4 y Ts6

En las trincheras Ts4 y Ts6 se interpretó la presencia de varios anticlinales especialmente presentes en la arcilla Ia. A continuación argumentamos porque consideramos que los anticlinales anteriores son reflejo de plegamiento, el cual a su vez se relaciona con fallas oblicuas inversas-sinestrales, que desplazan el sustrato que subyace a la unidad Ia:

1) Las características reológicas de la arcilla Ia debido a su alta plasticidad favorecen el desarrollo de deformación dúctil y no frágil. Las únicas trincheras donde las fallas cortan y desplazan la arcilla Ia son las fallas F5 y F8 en las trincheras Ts4 y Ts5 respectivamente. Por otro lado, estas fallas resultaron ser posiblemente las más relevantes en cuanto a la magnitud de los desplazamientos y la deformación plástica asociada, entre las trincheras cartografiadas en el sitio Cocorí. Así, en la cara oeste de la trinchera Ts4, a la falla F5 se le asocia el pliegue A1, el cual se identifica por el leve plegamiento de la arcilla Ia y porque aflora el lahar La en el núcleo del pliegue (Figs. 7 y 14). Mientras que en la cara este de Ts4, la falla F5 muestra una separación de inclinación de 1,8 metros en el contacto entre Ia e Imo. En la trinchera Ts5 se determinó la falla F8, la cual desplaza la arcilla Ia y los lentes Iaa dentro de ésta. Sin embargo, el trazo de esta falla pierde desplazamiento tan solo un par de metros al sur de donde la falla corta las diferentes capas relativamente más rígidas del pliegue A4. Tanto es así, que entre los metros 7 y 11 el trazo de la falla en la trinchera es inferido. Lo anterior se explica porque aunque estamos en presencia de una falla con desplazamiento importante, considerando tanto el plegamiento asociado con la misma así como la magnitud de sus componentes de inclinación y de rumbo, al cortar la falla F8 la arcilla Ia, dadas sus características de alta plasticidad, ésta no favorece el desarrollo de deformación frágil.

2) Las diversas estructuras (fallas, excepto F4, y los pliegues anticlinales) muestran vergencia al sur. Es decir, las fallas F1, F2, F3, F5, F8 tienen inclinación al norte y por tanto vergencia en la dirección opuesta. Igualmente, los diversos anticlinales A2, A3, A5, A6 y A7 y el pliegue A4 asociado con F8 muestran una vergencia al sur (Figs. 14 y 15C). Es decir fallas y pliegues muestran un mismo estilo estructural en la zona comprendida entre el pie del escarpe de la loma L2 y unos 40 metros al sur de este.

3) Del lado norte entre las lomas alargadas L1 y L2, las trincheras Tn1 y Tn2 (Figs. 2A y 3A) no mostraron el desarrollo de anticlinales en la unidad Ia, sobreyacente al lahar La. Asimismo, en la trinchera Ts7, localizada del lado sur del río Aguacaliente y relativamente cerca del sitio Cocorí (Fig. 2A), la arcilla Ia que sobreyace al lahar La, donde el contacto entre ambos tiene una muy suave inclinación al sur, tampoco muestra el desarrollo de anticlinales. Es decir, la presencia de los anticlinales es un fenómeno que está localizado en una zona restringida muy cerca del escarpe asociado con la falla Cocorí y por lo tanto se pueden relacionar los anticlinales con plegamiento tectónico.

Considerando que la anterior interpretación está bien fundamentada, se podría inferir la continuidad lateral de las estructuras entre las trincheras Ts4 y Ts6 (Fig. 14). Es decir, en la cara W de Ts4, a la falla F5 se le asocia un leve plegamiento (Fig. 7B). Lateralmente, este leve plegamiento no se observa en la cara E de Ts4 (Fig. 7A), pero la falla F5 conserva en ambas caras un importante desplazamiento de la unidad Ia (Fig. 7). En la cara W, la falla F5 sobrecorre Ia sobre lo que se interpreta son los depósitos asociados con un paleocanal y también con respecto a la unidad Ia, localizada en el piso de esa falla. Continuando al este, en la trinchera Ts6, F5 perdería desplazamiento y originaría el plegamiento A5 (Fig. 12A), que por otro lado, es el de mayor amplitud en Ts6 ($\approx 1,0$ metro). De la misma manera se sugiere la continuidad lateral del plegamiento A2 en Ts4 con A6 en Ts6 y de A3 en Ts4 con A7 en Ts6 (Fig. 14).

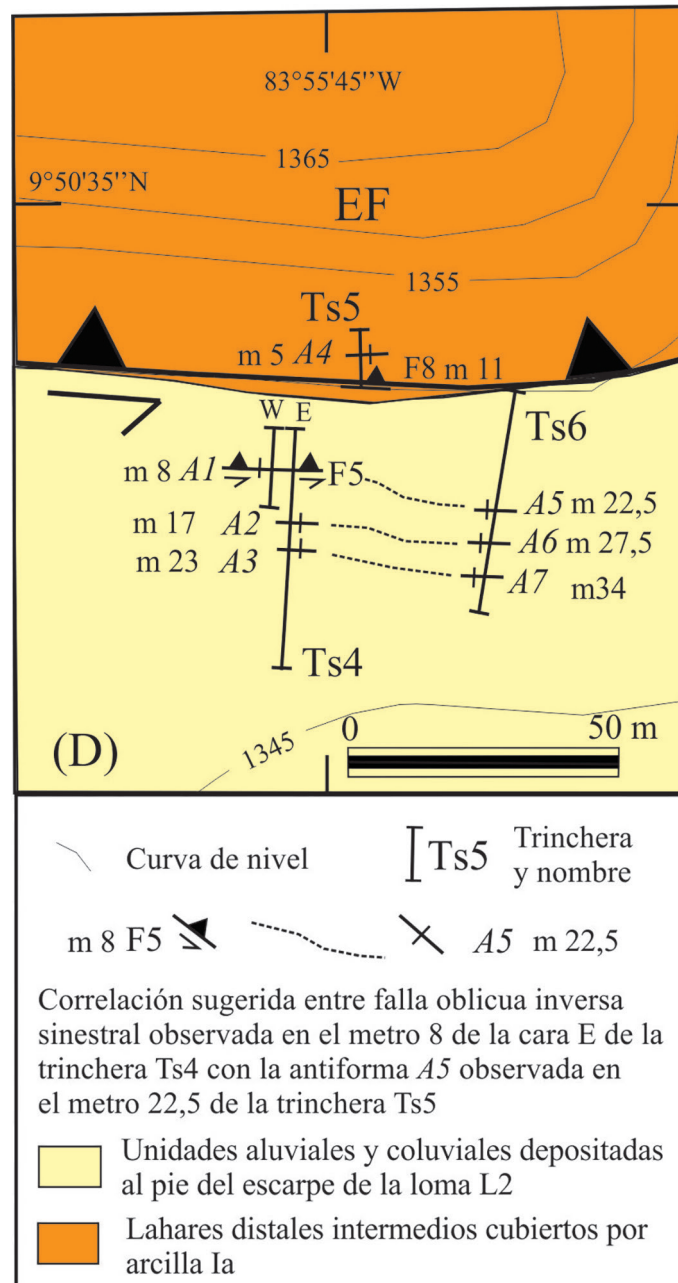


Fig. 14: Muestra la geología, la localización de las trincheras Ts4 (caras oeste (W) y este (E)), Ts5 y Ts6 y la ubicación en metros donde se determinaron las diversas estructuras tectónicas (fallas y pliegues) en cada trinchera. Se sugiere una continuidad de la falla F5 con el pliegue A5, de A2 con A6 y de A3 con A7. EF es el escarpe de flexura asociado con la loma alargada L2. Ubicación en figura 2A.

Evidencia de paleosismos

La información que aportan las trincheras del sitio Cocori es principalmente estructural y geométrica de las deformaciones pleistocenas a recientes asociadas con el movimiento de la falla Cocorí. Las propiedades mecánicas de los materiales implicados en la deformación, en las que domina la ductilidad, y el bajo buzamiento de los planos de cizalla, impide que en

la zona del escarpe se generen planos de fractura y una estratigrafía asociada, que permita identificar la recurrencia paleosísmica. Esta limitante imposibilita definir con adecuada precisión las edades de los paleosismos ocurridos en el frente sur de la Zona Transpresiva de Cartago, dado que no se pudo determinar edades máximas de unidades no deformadas. En el caso de la trinchera Ts4, esto era posible si se hubiera datado la parte inferior de la unidad Pao y la unidad más joven de las unidades subyacentes plegadas. Aun así, las dataciones obtenidas en las trincheras Ts5 y Ts6 permiten definir una actividad paleosísmica, que cubre un espacio de tiempo que va entre la parte alta del Pleistoceno Superior y el Holoceno (anterior a 28000 años y menos de 10000 años; Cuadros 2 y 3). A continuación se discuten primero las evidencias paleosísmicas determinadas en las trincheras Ts4, Ts5 y Ts6 y en segundo lugar cuales de las mismas llevan a la identificación de un paleosismo (Fig. 15). Lo anterior se realiza mediante un análisis espacio-temporal, similar al aplicado en Audemard (2011), mediante el cual se define si las evidencias encontradas en las trincheras permiten identificar algún paleosismo.

Evidencias paleosísmicas 1 y 2 (Ev1 y Ev2) y paleosismo 1 (Ps1)

La evidencia paleosísmica 1 (Ev1) proviene de la trinchera Ts5, en la cual se observa que la unidad Ia tiene edades carbono 14, que se ubican entre Cal 2σ AP 27685 y 27620 años (muestra del techo de la falla F8) y Cal 2σ AP 24560 y 24195 años (muestra del piso de la falla F8) (Fig. 10 y Cuadro 2). Por lo tanto, los desplazamientos más recientes en la falla F8 son posteriores a las anteriores dataciones (Cuadro 3 y Fig. 15).

La evidencia paleosísmica 2 (Ev2) se fundamenta en la observación de que en el bloque del techo de la falla F8, el plegamiento recumbente ocurrió en dos etapas, como lo evidencia la discontinuidad presente en el piso de la unidad M (Fig. 10). Es decir, la deformación plástica que afectó a las capas N, H1, H2 y H3 es anterior a la discontinuidad representada en el piso de la unidad M. Además, la edad de esta discontinuidad es mayor que la de la unidad Ia. Ev2 nos lleva a la identificación de un paleosismo (Ps1) en la falla F8, que ocurrió antes de la sedimentación de la unidad Ia (Cuadro 3 y Fig. 15).

Por otro lado, la ocurrencia de al menos dos paleosismos en la falla F8, posteriores a Cal 2σ AP 27685 y 27620 años y Cal 2σ AP 24560 y 24195 años, en la trinchera Ts5, es fuertemente sugerida a partir de las observaciones reportadas previamente para Ev1 y Ev2 y por las siguientes: 1. La falla F8 tiene una separación de rumbo, que se puede estimar es del orden métrico o mayor, dadas las notables diferencias estratigráficas entre las unidades del bloque del techo con respecto a las del piso de la falla F8 (Fig. 10). 2. Una importante deformación de las capas adyacentes a las fallas F8 y F9, llevó al desarrollo de un pliegue recumbente a acostado A4, el cual ocurrió en dos etapas (Fig. 10). 3. La magnitud de la separación de inclinación (SI) de 0,88 m determinada en la falla F8 (Figs. 10 y 11), combinado con la componente de rumbo, desconocida pero de orden métrica (ver punto 1), implica un desplazamiento neto en la falla mayor al metro, el cual se puede relacionar con uno o más paleosismos dependiendo de sus magnitudes. Por ejemplo, si el paleosismo se relaciona con una ruptura cosísmica de las fallas Aguacaliente (longitud 10 km) y Capellades (longitud 24 km) y de la barrera geométrica relacionada con la ZTCA (longitud transversal mínima de 6 km), se tendría un longitud de unos 40 km. Usando la relación de Wesnousky (2008) para fallas de desplazamiento de rumbo recomendada por Stirling, Goded, Berryman y Litchfield (2013), para un ambiente tectónico similar al del CDCCR:

$$M_w = 5,56 + 0,87 \log L$$

donde M_w es la magnitud momento y L es la longitud de ruptura superficial, se determina que M_w es igual a 7,0. Un valor de desplazamiento métrico es posible que se pueda relacionar con una ruptura de falla asociado con un sismo de magnitud M_w 7,0. Sin embargo, para un sismo de magnitud M_w 6,5, los desplazamientos en superficie serían bastante menores.

Lo anterior permite concluir, que el desplazamiento y la deformación por plegamiento asociado con la falla F8, incluye la ocurrencia de al menos dos paleosismos en la trinchera Ts5. Sin embargo, de estos solamente para el primer paleosismo (Ps1) se tiene una edad máxima de ocurrencia (entre Cal 2σ AP 27685 y 27620 años y Cal 2σ AP 24560 y 24195 años). Para el segundo paleosismo, solo se conoce su edad mínima de ocurrencia, que sería posterior a Cal 2σ AP 27685 y 27620 años y Cal 2σ AP 24560 y 24195 años. Siendo esta ubicación temporal tan amplia, se espera al análisis de las otras evidencias paleosísmicas determinadas en las trincheras Ts4 y Ts4 para el período posterior a Cal 2σ AP 10270 a 10200 años, para tratar de ubicar mejor algún otro paleosismo. Es posible también esperar que haya(n) ocurrido algún(algunos) paleosismo(s) en el

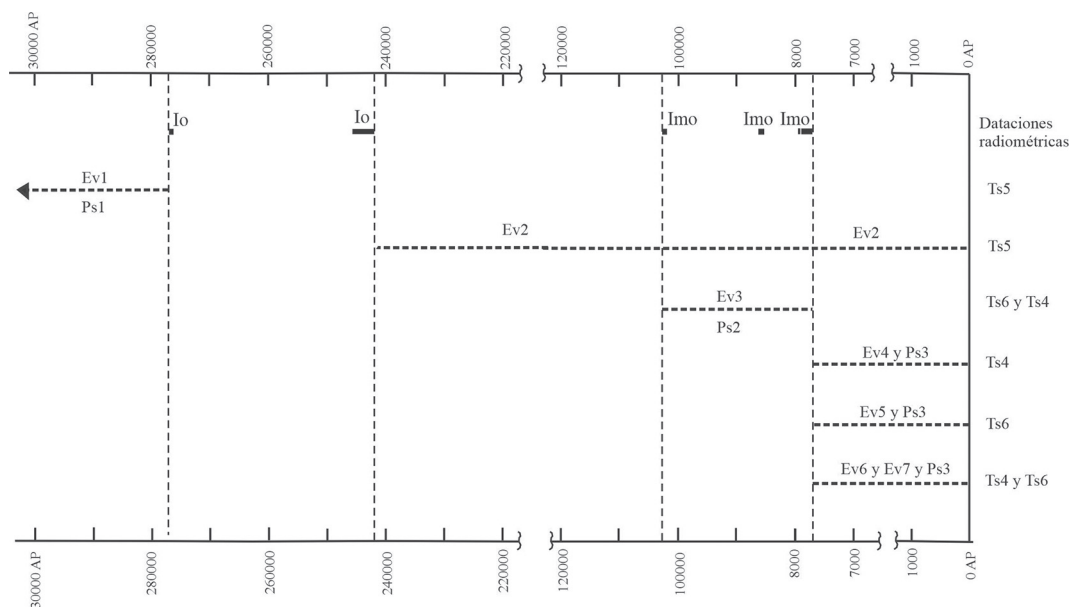


Fig. 15. Diagrama espacio-temporal mostrando la ubicación temporal de las dataciones radiométricas realizadas en las trincheras Ts5 y Ts6. Asimismo, se ubican temporalmente las evidencias paleosísmicas (Ev1 a Ev7) y las de los paleosismos (Ps 1 a Ps3) identificados en las trincheras Ts4, Ts5 y Ts6. Las líneas a trazos horizontales indican el intervalo de tiempo que cubren las Ev1 a Ev7, al igual que los Ps1 a Ps3. La ubicación temporal de Ps1 puede ser mayor a los 30000 años AP, según indica la flecha. Las líneas a trazos verticales indican el intervalo de tiempo que cubren las dataciones realizadas para Io e Imo (indicadas por barras rectangulares).

período comprendido entre Cal 2σ AP 27685 y 27620 años y Cal 2σ AP 24560 y 24195 años y Cal 2σ AP 10270 a 10200 años, pero la información disponible no permite identificarlo(s).

Evidencia paleosísmica 3 y paleosismo 2 (Ps2)

En la trinchera Ts6 se dataron tres muestras por carbono 14 de la capa Imo (Fig. 12). Las edades determinadas fueron Cal 2σ AP 10270 a 10200 años, Cal 2σ AP 8640 a 8540 años y Cal 2σ AP 7900 a 7690 años (Cuadro 2). Las dos primeras muestras fueron tomadas en el piso de la unidad y la última cerca del mismo. Lo anterior sugiere que el depósito de esta unidad fue diacrónico y empezó hace al menos unos 10000 años. La unidad Imo se infiere de ambiente pantanoso y el tamaño de esta cuenca debió haber ido variando a través del tiempo. Al ambiente de ciénega ayudó la presencia de la arcilla Io subyacente, que actuó como una barrera para la infiltración del agua de lluvia. Actualmente, aún se encuentra agua empozada en algunos sectores cercanos a las trincheras realizadas.

En la trinchera Ts6 es posible inferir el paleosismo Ps2, ocurrido entre el fin del depósito de la unidad Ia y el inicio de la depositación de la unidad Imo (Figs. 12A y 12B). La evidencia paleosísmica Ev2 sería el depósito de la unidad coluvial Co-L y se considera que Ps2 originó este coluvio, el cual sería cosísmico. Ps2 se relacionaría con la aceleración fuerte del terreno, el cual provocó que un gran número de bloques cayeran desde el escarpe, ubicado del lado norte de la trinchera, y se depositaran al pie de este. Además, muchos de estos bloques rodaron más al sur de donde termina la unidad coluvial Co-L y aparecen en el contacto entre las unidades Ia e Imo. Esto se observa tanto en la trinchera Ts6 como en la TS4 (Figs. 7, 8, 12 y 13). Si la interpretación anterior es correcta, el paleosismo Ps2 debió ocurrir después de que finalizó la sedimentación de Ia y en forma más o menos simultánea con la sedimentación de la base de Imo, que como ya vimos ocurrió entre Cal 2σ AP 10270 a 10200 años, Cal 2σ AP 8640 a 8540 años y Cal 2σ AP 7900 a 7690 años. Por tanto, este paleosismo Ps2 habría ocurrido en el inicio del Holoceno (Cuadro 3 y Fig. 15).

Cuadro 2

Edades de radiocarbono convencionales (AP 1950) calibradas usando IntCal04 obtenidas para las trincheras Ts5 (COCI) y Ts6 (COCII).

No muestra	No Labor.	$\Delta 13\text{ C}$	Edad Radiocarbono (años AP)	Cal 2 σ AP años	Edad calibrada 2 σ cal años AC (95% probabilidad)	Distribución valores de probabilidad (%)	Unidad y ubicación aproximada	Material
COCI-1	Beta-441814	-17,5	7810 \pm 40	8640 a 8540	AC 6690 a 6590	95	Base de Imo. Metro 22,7	Sedimento orgánico
COCI-2	Beta-441815	-17,6	9090 \pm 40	10270 a 10200	AC 8320 a 8250	95	Base de Imo. Metro 23,0	Sedimento orgánico
COCI-3	Beta-441816	-21,3	6960 \pm 40	7925 a 7900 7870 a 7690	AC 5975 a 5950 AC 5920 a 5740		Base de Imo. Metro 35,0	Sedimento orgánico
COCII-1	Beta-441817	-21,3	20310 \pm 90	24560 a 24195	AC 22610 a 22245	95	Ia, metro 6,7 en piso falla F8	Sedimento orgánico
COCII-2	Beta-441818	-22,0	23640 \pm 110	27685 a 27620	AC 25915 a 25670	95	Ia, metro 7,0 en techo falla F8	Sedimento orgánico

Evidencia paleosísmica 4 y paleosismo 3 (Ps3)

En la cara este de la trinchera Ts4 (Fig. 7A) hay evidencia de un paleosismo posterior a Cal 2 σ AP 10270 a 10200, Cal 2 σ AP 8640 a 8540 y Cal 2 σ AP 7900 a 7690 años, dado que la falla F5 desplaza la unidad Imo. Este paleosismo Ps3 es posterior al paleosismo Ps2. Además, la magnitud de la separación de inclinación (SI) de 1,8 m de la falla F5 indica la ocurrencia de al menos dos paleosismos, dependiendo de la magnitud de estos, según se razonó previamente. Asimismo, la falla F5 se ubica en una posición espacial que está claramente al sur de la falla F8 (Figs. 14 y 15C). Aunque ambas fallas pueden ser ramales de una falla principal y converger en la misma a cierta profundidad, es razonable pensar que ambas tuvieron una historia de desplazamientos diferentes. Por lo anterior, es apropiado considerar que el evento 3 y otros asociados con F5, son diferentes de los asociados con F8, aunque no se puede descartar desplazamientos simultáneos en ambas fallas relacionados con un mismo paleosismo. Además, F5 originó el plegamiento A1 y si la interpretación de que la falla F5 lateralmente se continúa con el anticlinal A5 es correcta, Ps3 también está reflejado en el desarrollo estructural de A5 (Figs. 12 y 14).

Evidencia paleosísmica 5

La evidencia paleosísmica 5 no se asocia con ninguna falla en particular. Se relaciona con la deformación sin-sedimentaria que muestra la capa Cfm y la base de la unidad Cgr (Fig. 12). Se sugiere por la presencia de estructuras de deformación, posiblemente por carga, como replegamientos, convoluciones y estructuras de escape (sismitas), las cuales podrían haber sido generado por un paleosismo (Fig. 12D; T. Aguilar, comunicación verbal, febrero 2020). Por ejemplo, en la figura 12D, la flecha con el número 1 evidencia que el contacto entre Cfm y Cgr se plegó cuando ocurrió esta posible sismita. Debe observarse que bajo la unidad Cfm se ubica la unidad Imo, una capa que se depositó en un ambiente posiblemente parálico, con abundante presencia de materia orgánica, lo cual señala un ambiente bajo en oxígeno (T. Aguilar, comunicación verbal, febrero 2020). La edad de esta sismita sería más reciente que la edad de la unidad Imo, cuya base tiene una edad entre Cal 2 σ AP 10270 a 10200 años, Cal 2 σ AP 8640 a 8540 años y Cal 2 σ AP 7925 a 7690 años. La evidencia paleosísmica 5 tiene las mismas características temporales que el paleosismo Ps3 y puede corresponder o no con evidencia adicional del mismo.

Cuadro 3

Evidencias paleosísmicas (Ev1 a Ev7) y de paleosismos o eventos de deformación (Ps1 a Ps3) definidos en las diversas trincheras.

No evidencia paleosísmica y de paleosismo	Nombre trinchera	Falla origen propuesta	Edad máxima AP	Edad mínima AP	Observaciones
Evidencia paleosísmica 1 y Paleosismo 1 (Ps1)	Ts5	F8		Paleoevento previo al período comprendido entre Cal 2 σ AP 27685 a 27620 años y Cal 2 σ AP 24560 a 24195 años	Ps1 se deduce a partir de la discontinuidad en la base de la unidad M, cuya edad es mayor que la de la unidad Io. Por debajo de M las capas muestran una posición sub-vertical.
Evidencia paleosísmica 2	Ts5	F8	Posterior al período comprendido entre Cal 2 σ AP	27685 a 27620 años y Cal 2 σ AP 24560 a 24195 años	Falla ciega F8 desplaza la unidad Io. La separación de inclinación es de 0,88 m. No se asocia paleosismo porque el rango temporal es muy amplio.
Evidencia paleosísmica 3 y paleosismo 2 (Ps2)	Ts4 y Ts6	No asociado con falla específica	Posterior al período comprendido entre Cal 2 σ AP 27685 a 27620 años y Cal 2 σ AP y 24560 a 24195 años	Período comprendido entre Cal 2 σ AP 10270 a 10200 años y Cal 2 σ AP 7870 a 7690 años	Ps2 se asocia con coluvio Co-L en Ts6 y bloques en contacto entre Io e Imo observados en Ts4 y en Ts6.
Evidencia paleosísmica 4 y paleosismo 3 (Ps3)	Ts4	F5	Más reciente que Cal 2 σ AP 10270 a 10200 años y Cal 2 σ AP 7870 a 7690 años		Ps3 se deduce porque falla F5 sobrecorre la unidad Io con respecto a Imo. Ps3 es más reciente que Ps2. F5 sugiere la ocurrencia de al menos 2 paleosismos dada la separación de inclinación de 1,8 metros. Lateralmente se infiere que F5 originó el anticlinal A5.
Evidencia paleosísmica 5	Ts6	No asociado con falla específica	Más reciente que Cal 2 σ AP 10270 a 10200 años y Cal 2 σ AP 7870 a 7690 años		Posible paleosismo posterior a PS2 relacionado con deformación sin-sedimentaria en la unidad Cfm y en el piso de Cgr. Puede relacionarse o no con el paleosismo Ps3
Evidencias paleosísmicas 6 y 7	Ts4 y Ts6	Pliegues A2, A3, A6 y A7 asociados respectivamente con las fallas inferidas F6 y F7	Más reciente que Cal 2 σ AP 10270 a 10200 años y Cal 2 σ AP 7870 a 7690 años		Evidencias paleosísmicas pueden relacionarse o no con el paleosismo Ps3

Evidencias paleosísmicas 6 y 7

El origen de los pliegues A2 y A3, se sugiere, se relacionan respectivamente con las fallas F6 y F7 (Fig. 15C), ambas con componente inversa y posiblemente también sinistral, ambas presentes bajo el nivel del piso de la trinchera Ts4 (Fig. 7). Asimismo, las fallas F6 y F7 lateralmente se pueden prolongar con los pliegues A6 y A7 (Fig. 14). Considerando lo anterior, se puede plantear que el desarrollo de las deformaciones plásticas de la arcilla Ia ocurrieron en una secuencia temporal, donde cada pliegue se relaciona con un pliegue por propagación de falla. Entonces, el primero que se formó fue el pliegue A1-A5

asociado con la falla F5. Esta sería evidencia paleosísmica adicional de la número 4 que se asoció previamente con el paleosismo Ps3 (Cuadro 3). Luego, al propagarse la falla hacia el sur, el siguiente pliegue que se formó fue el pliegue A2 relacionado con la falla F6 (Fig. 15C). Este sería la evidencia paleosísmica 6 (Cuadro 3). Si nuestro modelo de continuidad lateral de las estructuras A2-A6 es correcto, entonces también A6 se asocia con la evidencia paleosísmica 6 (Fig. 14). Finalmente, la propagación más reciente de la falla hacia el sur originó el pliegue A3 asociado con la falla F7 (Fig. 15C), la cual sería la evidencia paleosísmica 7 (Cuadro 3). También, se asociaría con esta falla, el pliegue A7 (Fig. 14). El plegamiento A2 está erosionado en su región crestal (Figs. 7A y 9), sin embargo, dado que no hay una datación de la unidad Pao, no se cuenta con una edad máxima de la unidad no deformada que sobreyace este plegamiento. En el caso del pliegue A3, la unidad Fgr se sugiere levemente plegada y la sobreyace también la unidad Pao (Fig. 7). Sabemos que la edad máxima del plegamiento corresponde con la edad determinada para la unidad Imo, la cual se ubica entre Cal 2σ AP 10270 a 10200 años, Cal 2σ AP 8640 a 8540 años y Cal 2σ AP 7900 a 7690 años (Cuadro 2). Lo anterior, debido a que Imo se deformó pasivamente en la trinchera Ts6. Además, obsérvese que Imo está inyectada por la arcilla Ia, posiblemente por la formación de una grieta tensional en Ia, en la zona de cresta del pliegue A7 (Fig. 12B). La ubicación temporal de las evidencias paleosísmicas 6 y 7 no permiten definir un nuevo paleosismo, aunque sugieren la ocurrencia de dos eventos de ruptura posteriores al paleosismo 3. Sin embargo, tampoco se puede descartar la activación simultánea de varias fallas durante un mismo sismo.

Modelo neotectónico para el origen del sector sur de la zona transpresiva de Cartago

Las observaciones estructurales obtenidas en las diversas trincheras descritas previamente y la interpretación geomorfológica de las colinas L1 a L3 nos permiten elaborar un modelo tectónico para el origen del frente sur de la ZTCA (Figs. 1 y 2). A continuación se discute el modelo y sus implicaciones.

Quintanilla et al. (2008) elaboraron un perfil geológico ENE a WSW, con base en la información de pozos de agua, el cual corta oblicuamente la zona de levantamiento de las lomas L1 a L3. En ese perfil (Fig. 3 en Quintanilla et al., 2008) se muestra un sustrato compuesto por lavas del volcán Irazú, el cual es cubierto por una unidad de lahares antiguos, separados entre sí por lentes arcillosos, que se interpretan como paleosuelos o cenizas volcánicas alteradas a arcillas. En el perfil referido, los lahares antiguos y los lentes arcillosos tienen un espesor que varía entre 25 y 95 metros. La unidad de lahares antiguos de Quintanilla et al. (2008) tiene una distribución espacial similar con la unidad de lahares distales antiguos del mapa geológico de Montero et al. (2013b), los cuales se localizan al sur de la ciudad de Cartago. El techo de los lahares antiguos correspondería con el lahar La, encontrado en las trincheras de Cocorí. Con respecto a los espesores de las lavas, en una perforación la lava tuvo un espesor mínimo de unos 30 metros y en otras sólo se determinó la profundidad del techo de la misma (Fig. 3 en Quintanilla et al., 2008). En otro perfil localizado al oeste de la zona de estudio por los anteriores autores, los espesores mínimos de la lava variaron entre 45 y 55 metros. Por otro lado, Taylor (1994) reporta con base en perforaciones, lavas con profundidades y espesores variables, en los alrededores de la ciudad de Cartago. Estos últimos espesores son en varios casos bastante menores que los obtenidos de los perfiles de Quintanilla et al. (2008). Además, algunas veces las lavas están interestratificadas con otros depósitos epiclásticos o sedimentarios. La información estratigráfica anterior nos sirve de base para elaborar un modelo tectónico, de rumbo Norte-Sur y transversal al escarpe de la loma alargada L2 (perfil BB' en Fig. 2A), que explicaría los diferentes rasgos estructurales observados en las diversas trincheras, así como la morfología tectónica de las colinas L1 a L3 (Figs. 2 y 16).

En nuestro modelo consideramos que los lahares antiguos tienen un espesor de 25 m del lado norte de la quebrada Cangrejal (Fig. 16A), mientras que el mismo disminuye a unos 15 metros bajo la loma L2, considerando que conforme esta loma se iba levantando tectónicamente, se constituyó en una barrera frontal que reorientó los lahares lateralmente. Asimismo, se subdividen los lahares distales antiguos en tres unidades: lahares distales inferiores (Lai), lahares distales intermedios (Lam) y los lahares distales superiores (Las), cada uno a su vez separado por paleosuelos o lentes arcillosos (Pa) (Fig. 16A). Asimismo, la lava la dividimos en dos unidades, una superior (Lvs) y otra inferior (Lvi), ambas separadas por un paleosuelo (Fig. 16A). El espesor de la lava superior propuesto en nuestro modelo es de alrededor de 15 metros.

Considerando que el modelo tectónico que se plantea es uno de piel fina, se requiere que el esquema estratigráfico considerado anteriormente debería tener una distribución espacial de capas, con posiciones sub-horizontales, que cubran gran parte del actual valle de El Guarco, excepto en los sectores donde la estratigrafía sub-horizantal haya sido deformada por la ZTCA y en los bordes del valle. Para validar este modelo de capas sub-horizontales, consideramos que según Montero y Kruse (2006)

y Montero et al. (2013b), el origen de los valles de Coris y de El Guarco se relaciona con una depresión tectónica de origen transtensivo o pull-apart, limitada por las fallas Aguacaliente y Ochomogo (Fig. 1B). Considerando este esquema tectónico, es lógico esperar que la depresión fuera rellenada fundamentalmente por depósitos epiclásticos, principalmente abanicos laháricos, depositados al pie del escarpe norte de la falla Ochomogo, durante los periodos de actividad del volcán Irazú. Es decir, la mayoría de estos depósitos fueron transportados a lo largo de los diversos cauces que disectan las laderas sur a suroeste de este volcán y depositados en la zona de cambio de pendiente relacionada con el escarpe de falla del lado norte del pull-apart (falla Ochomogo; FOCHO en Fig. 1). El lahar más reciente asociado con esta actividad fue depositado a lo largo del río Taras en el año 1963, a raíz de las erupciones del volcán Irazú ocurridas entre los años 1963-1965 (Alvarado, 2000). También, se depositaron en la depresión tectónica de Coris-Guarco, depósitos volcanoclásticos incluyendo varias capas de ceniza, como fue la que por lixiviación se convirtió en la arcilla Ia, encontrada en las diversas trincheras del sitio Cocorí. Adicionalmente, se ha cartografiado el debris avalanche de Reventado, dentro de la depresión tectónica (Quintanilla et al., 2008). Finalmente, también se han identificado sedimentos aluviales y palustres dentro de la zona deprimida (Krushensky, 1972; Montero et al., 2013b). Es importante mencionar que Montero y Kruse (2006) consideraron que es probable que la falla Ochomogo esté actualmente inactiva o su actividad sísmica este disminuida si su rol tectónico ha cambiado. Esto sería así, si la ZTCA corresponde actualmente con una zona de falla activa transversal al pull-apart (*cross-basin fault*), que conecta la falla Aguacaliente con la falla Capellades (Fig. 1B). El otro resultado que parece validar una estratigrafía de capas sub-horizontales es el perfil realizado por Quintanilla et al. (2008) sobre el sector oeste del valle de El Guarco y sur del valle de Coris, con base en pozos de agua, que muestra una estratigrafía de capas sub-horizontales.

Partiendo de los anteriores aspectos estratigráficos se elabora el modelo tectónico siguiente en el cual se considera que el frente sur de la ZTCA corresponde con una falla inversa con componente de rumbo izquierda, que tiene tres niveles de *décollement* y dos rampas, los cuales originan en superficie dos pliegues por flexión de falla o *fault-bend folds* (Figs. 16A y 16B). El nivel de *décollement* inferior (Di en Fig. 16A), de baja resistencia o de alta presión de poro, se propone es un paleosuelo que se desarrolló entre lavas superiores e inferiores del volcán Irazú de una edad entre Pleistoceno Medio a Superior (Quintanilla et al., 2008). Este nivel de despegue sub-horizontal es bastante somero (se ubica entre 40 y 55 m bajo el nivel del terreno), y es diferente de otros niveles de despegue que subyacen otros plegamientos al noreste del sitio Cocorí, los cuales se muestran en la figura 1B. Asimismo, se propone que alrededor de los 180 m a lo largo del eje horizontal del perfil B-B' (Fig. 16A), la falla corta las lavas y los lahares distales inferiores, a lo largo de un nivel de rampa inferior (Ri en Fig. 16A). Alrededor de los 285 m a lo largo del eje horizontal del perfil B-B' (Fig. 16A), la falla luego de alcanzar un nivel superior de lentes de arcillas o un paleosuelo, que se propone recubre los lahares inferiores, se propaga a lo largo de un nivel intermedio de *décollement* (Dm en Figs. 16A y 16B). La flexión de la falla entre ambos niveles de despegue es lo que origina el primer pliegue por flexión de falla, que geomorfológicamente se expresa como las lomas alargadas L1 a L3 y cuyos sectores sur corresponden con escarpes de flexura (Figs. 2A, 16A y 16B). El basculamiento entre 20° a 35° al N, interpretado cerca del contacto entre lahares La y La1 en la trinchera Tn2 (Fig. 2A), se explicaría por la inclinación al norte del flanco norte del pliegue por flexión de falla presente entre las lomas L1 y L2 (Fig. 16A). Asimismo, el levantamiento tectónico asociado con el desarrollo del pliegue por flexión de falla originó el represamiento de sedimentos depositados por la quebrada Cangrejal, aguas arriba de las lomas L2 y L3, con edades entre el Pleistoceno Superior y el Holoceno (Figs. 2Ay 16A).

Las fallas F1 a F9 observadas en las trincheras Ts1, Ts4 y Ts5 (Fig. 16C), con excepción de F4 observada en Ts2 (Fig. 6), se propone se originaron en la zona axial sinclinal delantera del pliegue por flexión de falla, donde se concentra una alta deformación y se da una falta de espacio en la parte interna del sinclinal, lo cual favorece la formación de fallas (Fig. 16B). Esta zona axial sinclinal se propaga hacia el sur, conforme la falla principal aumenta su deslizamiento en la misma dirección. Los pliegues A2 y A3 en Ts4 (Figs. 7A y 9) y A5, A6 y A7 en Ts6 (Figs. 13A, 13B y 13C), muestran un flanco norte de pendiente suave y un flanco delantero sur de mayor inclinación indicando vergencia al sur en estos pliegues. Estos pliegues, se asocian con las fallas de propagación F5, F6 y F7 (Figs. 16B y 16C), las cuales debido a su carácter somero y reciente y el poco desplazamiento acumulado así como carácter plástico de la arcilla Ia, no han llegado a ser cortados por estas fallas. Representan por tanto, el frente de propagación más reciente al sur de este pliegue por flexión de falla (Figs. 16B y 16C). Debe observarse que en el perfil de la figura 3 del artículo de Quintanilla et al. (2008) se muestra la lava originando una estructura levantada, que sugiere un anticlinal bajo el pozo IS-105 (Ubicación en Fig. 2A), mientras que hacia el oeste la lava es cubierta por un importante espesor de lahares. Esto estaría de acuerdo con el patrón *en échelon* de pliegues y fallas inversas que se ha determinado para la ZTCA (Fig. 1B) (Montero et al., 2013b).

Al sur de la loma L2 y del segundo nivel de despeque (Dm), se infiere que la falla Cocorí alcanza una segunda rampa (Rs en Fig. 16B), la cual corta a través de los lahares distales intermedios (Lam) y luego alcanza un tercer nivel de *décollement* (Ds en Fig. 16B), en un nuevo nivel de arcilla, originando el desarrollo de un nuevo pliegue por flexión de falla, de una amplitud de pocos metros, razón por la cual no sobresale sobre el nivel del terreno en el corte B-B' (Figs. 16A y 16B). Sin embargo, al oeste del corte B-B', a lo largo del sector sur del corte A-A' (Figs. 2A y 2C), este pliegue levanta ligeramente arriba del nivel del terreno originando la loma L4. El flanco delantero de este pliegue estaría limitado por la falla sugerida que sigue el curso al ENE del río Aguacaliente (Figs. 2A y 2C), que correspondería con la posición más al sur de la falla Cocorí. Las evidencias en favor de este nuevo pliegue son las siguientes: 1) La falla F4 con inclinación al sur determinada en la trinchera Ts2 (Figs. 6 y 16B) se habría originado como una falla inversa trasera, cerca de la zona sinclinal norte de este segundo pliegue por flexión de falla. Obsérvese, que esta falla es la única que tiene una inclinación al sur, porque todas las fallas determinadas en las otras trincheras inclinan al norte. Además, en la trinchera Ts2 se sugiere una traza axial anticlinal evidenciada por un cambio de posición del contacto lahar (La)-arcilla (Ia), el cual tiene inclinación al norte en lo que sería el flanco norte del pliegue por flexión de falla, inferido bajo la loma L4, y luego hacia el sur, el contacto tiene una posición sub-horizontal en lo que sería la zona crestral de ese pliegue. Asimismo, en esa zona de traza axial se determinaron grietas tensionales con patrón en escalera, las que se relacionarían con una cizalla con componente normal, debido a la extensión que se propone debe existir en esta zona axial del pliegue. 2) También existe evidencia geomorfológica del pliegue bajo la loma L4. En el mapa de la figura 2A se muestra el pliegue bajo la loma L4 con un facetado al SSE, entre la traza axial anticlinal y la falla inferida a lo largo de un sector del cauce del río Aguacaliente de rumbo ENE. Asimismo, en el perfil A-A', el valle del río Aguacaliente es asimétrico, donde el lado norte tiene mayor altura que el lado sur. Esto concuerda con la presencia de una falla con componente inversa, que levanta el lado norte del valle respecto al lado sur. También la tirante t-t' mostraría una anomalía geomórfica al sugerir un levantamiento Lve2 de unos 8 metros, con respecto a la pendiente regional de los lahares distales (Fig. 2C). Finalmente, en nuestro modelo tectónico también se propone que entre las dos zonas axiales sinclinales contiguas, que están al sur de la loma L2 y al norte de la loma L4 (Figs. 16A y 16B), se originó una cuenca sedimentaria tipo *piggy-back*, la cual se rellenó con las diversas capas de sedimentos determinados en las trincheras Ts4 y Ts6, los cuales sepultan el lahar La, excepto en el lado norte de las excavaciones anteriores. Esta pequeña cuenca *piggy-back*, cuyo represamiento es controlado por el levantamiento frontal de la loma L4, es drenada por una quebrada intermitente, sin nombre, que va sub-paralela y al sur de las lomas L1 y L2 y al norte de la loma L4 (Fig. 2A). Esta pequeña cuenca se abre hacia el este donde tendría su depocentro.

Levantamiento vertical en la zona sur de la ZTCA

El modelo neotectónico propuesto en el capítulo anterior con el desarrollo de un pliegue por flexión de falla para las lomas alargadas L1 a L3 y otro pliegue similar sugerido para la loma L4, implica que la pendiente regional del abanico lahárico distal, ha sido alterado por el levantamiento tectónico (Lve1 y Lve2 en figura 2C y Lve en Fig. 16A) ocurrido en el sector sur de la ZTCA. El levantamiento tectónico Lve a lo largo del perfil B-B' se estima considerando la pendiente del abanico lahárico en la zona no afectada por la deformación tectónica, al norte de la quebrada Cangrejal, que es de $1,4^\circ$ al SSE y a partir de ahí se dibuja la tirante CC' (Fig. 16A), que proyecta la pendiente de los lahares por debajo de la loma L2 y luego al sur de la misma hasta donde se considera que no existe el efecto del levantamiento tectónico. La diferencia entre la tirante CC' con respecto a la altura de la loma L2 es el levantamiento vertical (Lve), debido al pliegue por flexión de falla (Fig. 16A), que en nuestro caso es de alrededor de 20 m. A lo largo del perfil A-A', el levantamiento tectónico Lve1 relacionado con la loma 1 se estima en 12 metros, mientras que en la loma L4, Lve2 se estima en 8 m. Las lomas alargadas L1, L2 y L3 tienen una morfología bien conservada y no se muestran disectadas, excepto donde las corta la quebrada Cangrejal, la cual es antecedente y tiene un cauce angosto donde corta entre ambas lomas. Lo anterior sugiere que el pliegue por flexión de falla es relativamente reciente. Si por ejemplo, se considera que ese levantamiento tectónico ha ocurrido en los últimos 100000 años, se tendría que la tasa de levantamiento que llevó al desarrollo de la loma L2 sería de $\approx 0,2$ mm/año. Sin embargo, ese levantamiento vertical de unos 20 metros observado a lo largo del perfil B-B' está condicionado por la componente vertical de la rampa, que origina el pliegue por flexión de falla. Este tipo de pliegues se caracterizan porque una vez que han alcanzado cierta amplitud máxima (que depende de la pendiente y longitud de la flexión de la falla), aunque la falla siga moviéndose, el pliegue ya no crece en altura, sino que se ensancha en sentido de su vergencia. Por lo tanto, este levantamiento no se puede relacionar directamente

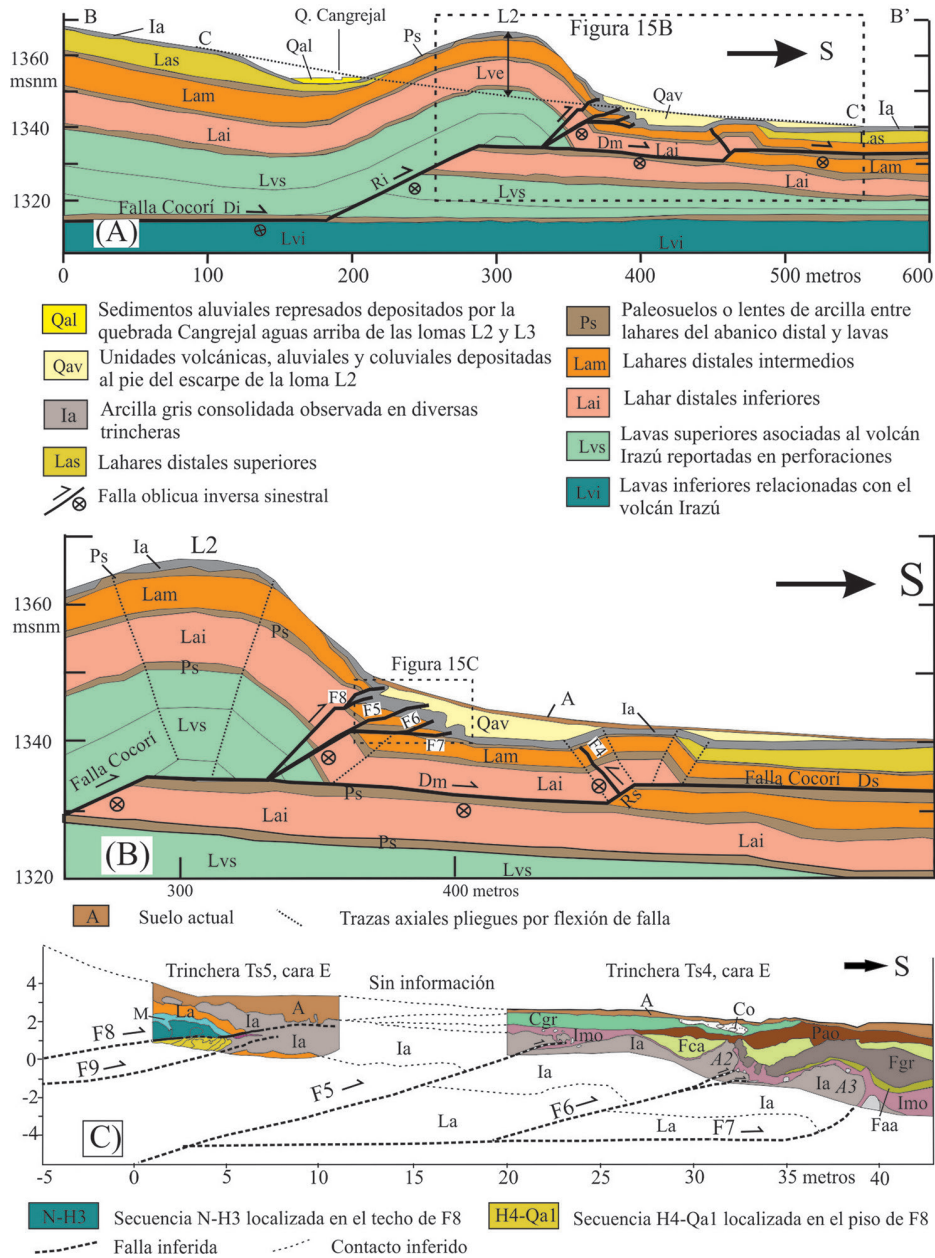


Fig. 16: (A) Perfil geológico B-B' (ubicación en figura 2A) mostrando el modelo tectónico de los pliegues por flexión de falla (*fault-bend fold*), para el sector sur de la zona transpresiva sur de Cartago. La falla principal oblicua inversa-sinistral y las fallas secundarias se muestran en color negro. La línea a puntos CC' es el tirante que conecta la pendiente regional del abanico lahárico distal, donde no ha sido afectado por la tectónica. La diferencia de altura entre la tirante y la altura máxima de la colina L2, define el levantamiento tectónico (Lve), relacionado con el pliegue por flexión de falla, que subyace L2. Un segundo pliegue por flexión de falla se propone al S de L2. Entre ambos se define una zona sinclinal que define la cuenca sedimentaria que ha sido rellenada por diversos sedimentos (Qav). También se muestra los depósitos aluviales (Qal) depositados por la quebrada Cangrejal aguas arriba de L2, que se consideran como un aluvial represado. El rectángulo a trazos negros define la ubicación de la figura 16B. La escala vertical está en metros sobre el nivel del mar (msnm). (B) Perfil de los pliegues por flexión de falla que subyacen L2 y el otro cubierto. Se detallan las trazas axiales y la falla principal y las secundarias que se determinaron en las trincheras (F4 a F8). También, se muestra la cuenca desarrollada en la zona sinclinal entre los dos pliegues por flexión de falla, rellena con los sedimentos Qav. El rectángulo a trazos negros define la ubicación de la figura 16C. (C) Croquis de las trincheras Ts5 y Ts4 mostrando las diversas fallas definidas en ambas trincheras (F8, F9 y F5) o que se infieren subyacen a los pliegues A2 y A3 (F6 y F7 respectivamente). El patrón de fallas oblicuas inversas-sinistrales y pliegues asociados sugiere una propagación del frente de fallamiento hacia el sur.

con la tasa de deslizamiento de la falla. Sin embargo, el salto neto de la falla podría ser mucho mayor de lo que parece solo considerando el levantamiento tectónico y por ende de la morfología. Por otro lado, si añadimos la componente de rumbo de la falla, tenemos que podríamos estar en presencia de una falla con un importante peligrosidad ubicada dentro de un contorno urbano que está en rápida expansión.

Aportes a la estratigrafía del sur del valle de El Guarco

Un resultado adicional de los estudios paleosísmicos realizados en el sitio de Cocorí, tiene relación con la cronología de la estratigrafía del sur del valle de El Guarco. Las dataciones por carbono 14 indican que el lahar más reciente del abanico lahárico distal, que cubre buena parte del sur del valle, incluyendo la zona de Cocorí, se depositó antes de Cal 2σ AP 27685 a 27620 y Cal 2σ AP 24560 a 24195 años. Posteriormente, en un período comprendido entre Cal 2σ AP 27685 a 27620 y Cal 2σ AP 24560 a 24195 años ocurrió el depósito de una capa de ceniza con un espesor del orden métrico, relacionada con un evento vulcaniano importante. Debe aclararse que la capa Ia que se dató por radiocarbono en la trinchera Ts5 (Figs. 10 y 11), corresponde con la capa de ceniza que fue retrabajada por la quebrada Cangrejal, al sur del escarpe de la loma L2. Esto explica su mayor espesor al sur de la loma L2 en comparación con el menor espesor que tiene en la trinchera Tn2 (Fig. 3) del lado noroeste de la loma L2, asimismo de la presencia de los lentes Iaa e Iab (Figs. 10 y 11) y de su contaminación con materia orgánica, lo cual permitió su datación por Carbono 14. Se sugiere que este evento volcánico se puede relacionar con el volcán Irazú, el más cercano a la ciudad de Cartago (Fig. 1B). Con el tiempo, esta capa se alteró a una arcilla gris plástica, que es bastante compacta en varios sectores. Es de observar que este evento volcánico cubrió un área significativa. Al menos en la zona estudiada se observa la capa de arcilla Ia recubriendo al lahar La en diversas trincheras del sitio Cocorí y en la trinchera Ts7, donde el lahar La también es cubierto por la arcilla Ia. Lo cual sugiere que el evento vulcaniano ocurrido alrededor de Cal 2σ AP 27685 a 27620 y Cal 2σ AP 24560 a 24195 años pudo ser de una extensión regional.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha demostrado mediante un estudio paleosismológico, complementado con consideraciones de morfología tectónica, que el origen de las colinas L1, L2 y L3, y posiblemente L4, que se encuentran ubicadas en el sector sur de la ZTCA, se relacionan con deformación neotectónica, caracterizada por fallamiento inverso y plegamiento asociado, con componente de rumbo, presumiblemente sinistral. Esta deformación se relaciona con el deslizamiento a lo largo de la falla Cocorí. Plegamiento por flexión de falla o *fault-bend fold* explicaría la morfología de las colinas L1 a L4 y las estructuras tectónicas determinadas en las diversas trincheras paleosismológicas realizadas. El levantamiento tectónico en la colina L2 se estima es alrededor de 20 metros, valor condicionado por la componente vertical de la rampa del pliegue por flexión de falla modelado. El modo de crecimiento de este tipo de pliegues permite afirmar que ese valor de 20 m debe considerarse como un valor mínimo y que el valor real de salto neto que generó el plegamiento, considerando además la componente en dirección, debió ser bastante mayor. Esta observación es consistente con las dimensiones laterales, que cabe esperar de una estructura, que genera rupturas en superficie ($M_w > 6.0$). Por otro lado, la determinación de desplazamientos netos del orden métrico en las fallas F5 y F8 y el plegamiento asociado con estas fallas, la determinación de las fallas F1, F2, F3 y F4 y la inferencia de las fallas F6, F7 a partir respectivamente de los pliegues A2-A6 y A3-A7, indican una actividad tectónica en la parte terminal del Pleistoceno Superior y en el Holoceno en el sitio Cocorí y la inferencia de al menos tres paleosismos en las fallas y pliegues identificados, lo cual hace de este sitio un lugar muy promisorio para futuros estudios paleosismológicos. Investigaciones adicionales en este sitio permitirían refinar la historia reciente de la falla Cocorí y su nivel de peligrosidad sísmica. Esto último es sumamente relevante considerando que esta falla se localiza dentro de una zona urbana, industrial y con importantes obras vitales cercanas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología (MICIT), mediante el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), por el financiamiento del Proyecto: “Estudio de la tectónica activa del sistema de fallas de Aguacaliente y Navarro del Valle Central mediante técnicas geodésicas y paleosísmicas: contribución para la mejora de la evaluación de amenaza sísmica”, código FI-012-10 (fondo restringido #1578). Igualmente, se agradece a la Universidad de Costa Rica por financiar el Proyecto 830-B1-504, como contraparte institucional al anterior proyecto. Igualmente se agradece al Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), dueño de la finca Aguacaliente, la autorización para realizar los diferentes estudios de trincheras. Se agradecen al árbitro Frank Audemard sus valiosos comentarios y correcciones de texto que ayudaron a mejorar el trabajo y en especial el capítulo relacionado con el análisis de los paleosismos. Asimismo, se agradece a la M. Sc. Teresita Aguilar por su ayuda para entender mejor la estratigrafía y el ambiente deposicional donde se excavaron las trincheras. Finalmente se agradece a las siguientes personas su colaboración en el trabajo de levantamiento de las trincheras: Luis Guillermo Salazar (trincheras Ts1, Ts2 y Ts3), Andrés Ulloa y Cristian Delgado (Tn1 y Tn2) y Meilyn Mora, Luis Boza, Juan Luis Porras y Galla Serra Rodón (trincheras Ts5 y Ts6). Igualmente a Ronald Aragón que proporcionó logística y apoyo de campo para la realización de las trincheras Tn1, Tn2 y Ts4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, G. E. (2000). *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Audemard, F. (2011). Multiple-trench investigations across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela after the 1997 Cariaco earthquake. *Geological Society of America, Special Paper*, 479, 133-157. doi:10.1130/2011.2479(06)
- DeMets, C. (2001). A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 28, 4043-4046.
- Instituto Geográfico Nacional (1991). *Hoja Tejar*. Escala 1:10000. San José: Instituto Geográfico Nacional.
- Krushensky, R. D. (1972). *Geology of the Istarú Quadrangle. Geological Survey Bulletin 1358*. Washington D. C.: United States Government Printing Office.
- McCalpin, J. P. (2009). Field techniques in Paleoseismology-Terrestrial Environments. En J. McCalpin (ed.), *Paleoseismology* (pp. 29-118). New York: Elsevier Inc.
- Marshall, J., Fisher, D. M., y Gardner, T. W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. *Tectonics*, 19, 468-492.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- Montero, W., y S. Kruse (2006). Neotectónica y geofísica de la falla Agua Caliente en los valles de Coris y del Guarco. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 43-58.

- Montero, W., Lewis, J., Marshall, J., Kruse, S., y Wetmore, P. (2013a). Neotectonic faulting and fore arc sliver motion along the Atirro-Río Sucio fault system, Costa Rica, Central America. *Geological Society of America Bulletin*, 125(5-6), 857-876. doi: 10.1130/B3047.1
- Montero, W., Obando, L., Mora, R., Salazar, L. G., y Leandro G. (1991). *Informe Final Proyectos Habitacionales Los Diques y Duarco-Suerre*. San José: Universidad de Costa Rica. Informe interno.
- Montero, W., Obando, L. y Rojas, W. (2009). *Estudio de amenaza de ruptura de falla para el proyecto Habitacional del Comité de Vivienda de Cocori, Aguacaliente, Cartago*. San José: Universidad de Costa Rica. Informe interno.
- Montero, W., Rojas, W., y Linkimer, L. (2013b). Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de falla Aguacaliente, falda sur macizo Irazú-Turrialba, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 48, 119-139.
- Peytrequín, J., y Aguilar, M. (2007). Los indicadores arqueológicos de un modo de vida cacical en el sitio Agua Caliente. *Vínculos*, 30, 57-81.
- Quintanilla, E., Alvarado, G. E., Marín, C., y Durán, M. (2008). Volcano-estratigrafía de pozos como un aporte al conocimiento de la geología del cuaternario del valle de El Guarco (Cartago), Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 38, 53-64.
- Rojas, W., y Montero, W. (2006). *Estudio sismológico y de fallamiento activo para el proyecto habitacional de Soinco S. A. en Agua Caliente, Cartago*. San José: Universidad de Costa Rica. Informe interno.
- Stirling, M. Goded, T., Berryman, K., y Litchfield, N. (2013). Selection of Earthquakes Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2993-3011. doi: 10.1785/0120130052
- Taylor, W. (1994). *Características sismo-dinámicas del suelo blando en la región central de la ciudad de Cartago, Costa Rica* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and process of the earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 1609-1632.