ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN EL PIEDEMONTE DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Trabajo de grado para optar al titulo de Maestría en Ciencias de la Tierra

Por:

MYRIAM CARLOTA LÓPEZ CARDONA

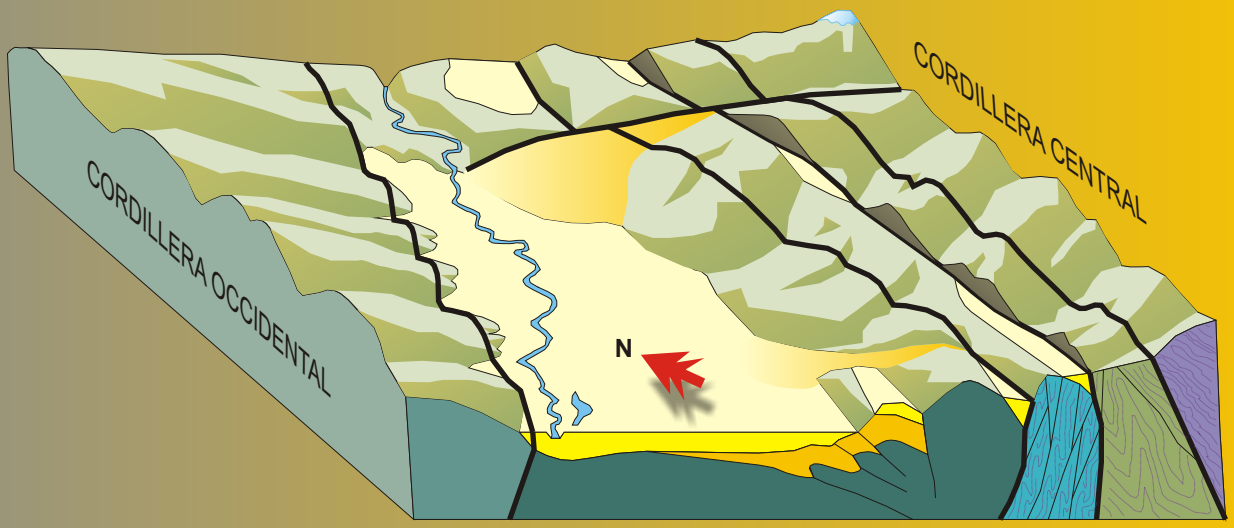
Directores:

Prof. Franck A. Audemard
Prof. Gloria Elena Toro

UNIVERSIDAD EAFIT
Programa de GEOLOGíA

Medellín
Agosto de 2006

ANEXOS



Corporación OSSO

ANEXO 1

METODOLOGÍA: AMPLIACIÓN DE CONCEPTOS

ANEXO 2

EL REGISTRO GEOMORFOLÓGICO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA: DETALLE

ANEXO 3

EL REGISTRO ESTRATIGRÁFICO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA : DETALLE

ANEXO 4

RELACIONES DE LAS FALLAS CON LOS ESFUERZOS PRINCIPALES: DIEDRO RECTO

ANEXO 5

CUANTIFICAR EL TERREMOTO: MAGNITUDES

Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca,
Colombia – Contribuciones Paleosísmicas

Por:
Myriam C. López C.
Universidad EAFIT

ANEXO 3

EL REGISTRO ESTRATIGRÁFICO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL: DETALLES

RASGOS ESTRUCTURALES Y ESTRATIGRÁFICOS____ PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA CENTRAL

En este trabajo se aprovecharon varios cortes de carretera: la vía que conduce de Bugalagrande a Galicia, la Variante Tuluá y un corte de talud en el carreteable que conduce de Tuluá a La Iberia. Adicionalmente se aprovechó una trinchera realizada para construir un alcantarillado en el municipio de Tuluá y cortes naturales de los ríos. En estos sitios se hicieron diferentes aproximaciones paleosísmicas, pues en ellos se obtuvieron datos de estrías de fallamiento, materiales datables por radiocarbono y se midieron desplazamientos de fallas. Las medidas de desplazamientos y las dataciones fueron posibles con base en: a) un "horizonte guía" (gravas Cg) correspondiente a la base de la secuencia clástica del cuaternario que suprayace en discordancia las unidades del Terciario; b) paleosuelos sobrecorridos por fallas e intercalados en la secuencia de arenas con cenizas volcánicas que conforman la secuencia del Cuaternario; c) un paleosuelo sobrecorrido por la falla en el pié de estratos del Terciario y sellado a su vez por las gravas que conforman la base de la secuencia cuaternaria; c) en cuñas coluviales directamente asociadas al escarpe El Ahorcado con paleosuelos datables por ^{14}C. Por último, las evidencias que sugieren control tectónico en la sedimentación de las unidades del Cuaternario, se revelaron en las variaciones laterales de la secuencia clástica que aflora en la Variante Tuluá y en la Cantera El Vínculo.

Sector Río Bugalagrande

En la margen derecha del Río Bugalagrande se identificaron depósitos clásticos de edad cuaternaria suprayaciendo en discordancia las unidades de la Formación La Paila del Terciario. El plano de falla 4 se midió en el eje de un anticlinal de dirección general NNE y constituye la pared de una grieta rellena con arenitas de grano fino y abundante contenido de material volcánico. Material que constituye el tope de la secuencia cuaternaria del sector. El plano de falla 4 tiene expresión en superficie como una bifurcación de la Falla Bugalagrande que emerge en la parte baja de la Superficie La Llanada. Esta falla se interpreta como una falla de momento de plegamiento paralela al eje del plegamiento. Un poco más al norte sobre la carretera que conduce a Galicia se midieron otros planos de falla en la secuencia del Neógeno (Tabla 1). El plano de falla 1 de dirección general NS es de rumbo. Los planos 3 y 5 de dirección general NW tienen componente de rumbo. El plano 2 tiene componente vertical.

Tabla 1. Datos estructurales Sector Río Bugalagrande

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
1	N5W/40S	Plunge: 0	Horizontal
2	N30W/74W	Plunge: 74W	Vertical
3	N45W/60W	45W	Vertical con componente horizontal
4	N25E/70NW		

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
5	N60W/50N	5W	

Sector Tuluá

Las evidencias estructurales y estratigráficas de deformación tectónica se documentan en los siguientes afloramientos, localizados de norte a sur en la terminación noroeste de una terraza levantada en la margen derecha del Río Morales (Figura 1): A) El corte o talud de la carretera que de Tuluá conduce a la vereda La Iberia, denominado "Carreteable Oreja Norte"; B) El corte del talud en el intercambiador (oreja) de la carretera principal para entrar a la ciudad de Tuluá, denominado Cara Norte Oreja, C) El corte sur del mismo intercambiador denominado Cara Sur Oreja, D) El corte de la misma carretera unos 100m antes del intercambiador denominado Variante Tuluá-N; E) el corte sur de la variante denominado Variante Tuluá-S, F) una trinchera para alcantarillado realizada al suroeste de Tuluá denominada El Ahorcado y G) un corte natural en la margen izquierda del río Tuluá denominado Sur Río Tuluá. Los datos estructurales en este sector se muestran en la Tabla 2.

Los depósitos que conforman los abanicos de este sector, pueden resumirse de manera informal en una secuencia concordante que de base a techo presenta los siguientes horizontes:

Horizonte Cg: Está conformado por unas gravas que suprayacen en discordancia la Formación La Paila. Este nivel corresponde a gravas clastosoportadas subredondeadas que en los sectores revisados no superan los dos metros de espesor. Dado que en los lugares revisados es la base de la secuencia depositacional del Cuaternario (Holocena) que suprayace en discordancia las unidades de la Formación La Paila, éste horizonte se tiene en cuenta como un horizonte guía.

Horizonte Csp: Corresponde a arenas gruesas a guijosas con estratificación inclinada. La característica particular es que en afloramiento presentan una estructura columnar y color pardo claro, que lo hacen fácilmente distinguible. En los lugares revisados este horizonte presenta variaciones laterales en el espesor entre uno y dos metros. Las características de este horizonte sugieren que son depositados por corrientes fluviales bajo diferentes regímenes de flujo.

Horizonte Csm: Arenas gruesas masivas con guijos y cantos subangulares. El color es pardo naranja y tiene contacto onduloso con la unidad subyacente. El espesor promedio de este horizonte es de un metro. Las características del nivel sugieren que se trata de flujos de detritos provenientes del frente montañoso.

Horizonte Ccg. Arenas con cantos y gravas subangulares. Con pocas estructuras de depositación. Color café grisáceo. Se interpreta generado por flujos de detritos.

Horizonte Cc: En general la secuencia de arenas está suprayacida por un horizonte de arenas de tamaño de grano grueso a fino de color gris claro. En estas arenas se identificó abundante contenido de material volcánico. El espesor promedio es de un metro. Las características de este nivel sugieren que se trata de cenizas volcánicas retrabajadas por corrientes fluviales.

Horizonte A: corresponde al suelo orgánico de acumulación reciente. En general el color es negro. Dependiendo del sitio presenta variaciones entre 30 cm y un metro de espesor.

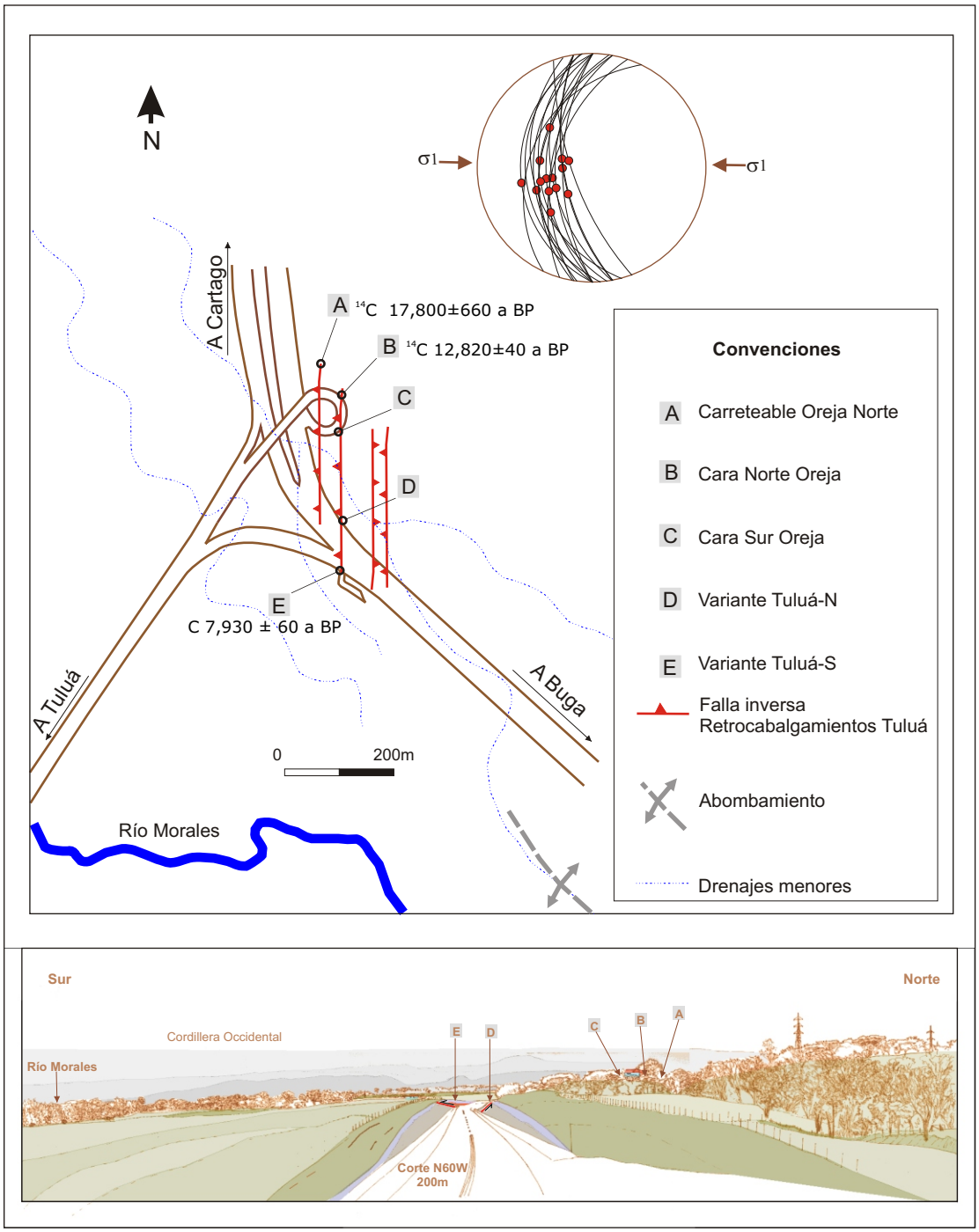


Figura 1. Arriba, esquema de localización de afloramientos del Sector Tuluá con los retrocabalgamientos identificados y representados en proyección estereográfica de las principales fallas observadas. Abajo, dibujo de la Variante Tuluá vista desde el este que corta el abombamiento de la terraza del río Morales. En el talud norte de la vía es evidente una falla de vergencia al oeste.

- Carreteable Oreja Norte

En este sitio una colina con eje largo NS fue cortada en su terminación norte por el carreteable rural que conduce de Tuluá a la población de La Iberia (A en Figura 1). Allí el corte de la carretera expone una falla inversa con orientación N5E/33ºW y estría N75E contenida en el plano vertical (Tabla 2). Esta falla corta a través de la secuencia sedimentaria del Terciario (Tp), compuesta por gravas, arenas y limos. Cerca de la superficie del terreno corta la secuencia cuaternaria-holocena, horizontes Cg, Csp, Csm y Ccg, sobrecorriendo un paleosuelo que yace sobre el horizonte Csp (Figura 2). La longitud del deslizamiento medido sobre el paleosuelo sobrecorrido es de 1.75 m, este paleosuelo se muestreo en el sitio P de la Figura 2. y fue datado en ^{14}C 17.800±660 a BP.

Tabla 2. Datos estructurales Sector Tuluá

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
Cara Sur Oreja			
1	N15W/35W	Trend:N70W	Inversa
2	N8E/40W	Plunge: 40N	Inversa
3	NS/46SW	trend:S80E	Inversa
Cara Norte Oreja			
4	N10E/40W	plunge:35NW	Inversa sinestral
5	NS/60NW	plunge:60NW	Inversa
6	N10W/52SW	plunge:52W	Inversa?
7	N10W/61W	plunge:58W	Inversa?
8	N7W/39W	trend:S77E	Inversa
9	N5W/30SW		
Variante Tuluá			
10	N10W/60SW	Plunge: 55SW	Inversa sinestral
11	N10E/50W	trend:N45E	Inversa dextral
12	N20W/70SW	plunge:65SW	
13	NS/35W		Inversa
14	NS/25W	trend:N80W	Inversa
15	N25E/32NW		Inversa
16	NS/54W	Pitch:73S	Inversa
17	N17E/52W	Pitch: 60S	Inversa
Carreteable Oreja Norte			
18	N5E/37W	Trend: N75E	Inversa

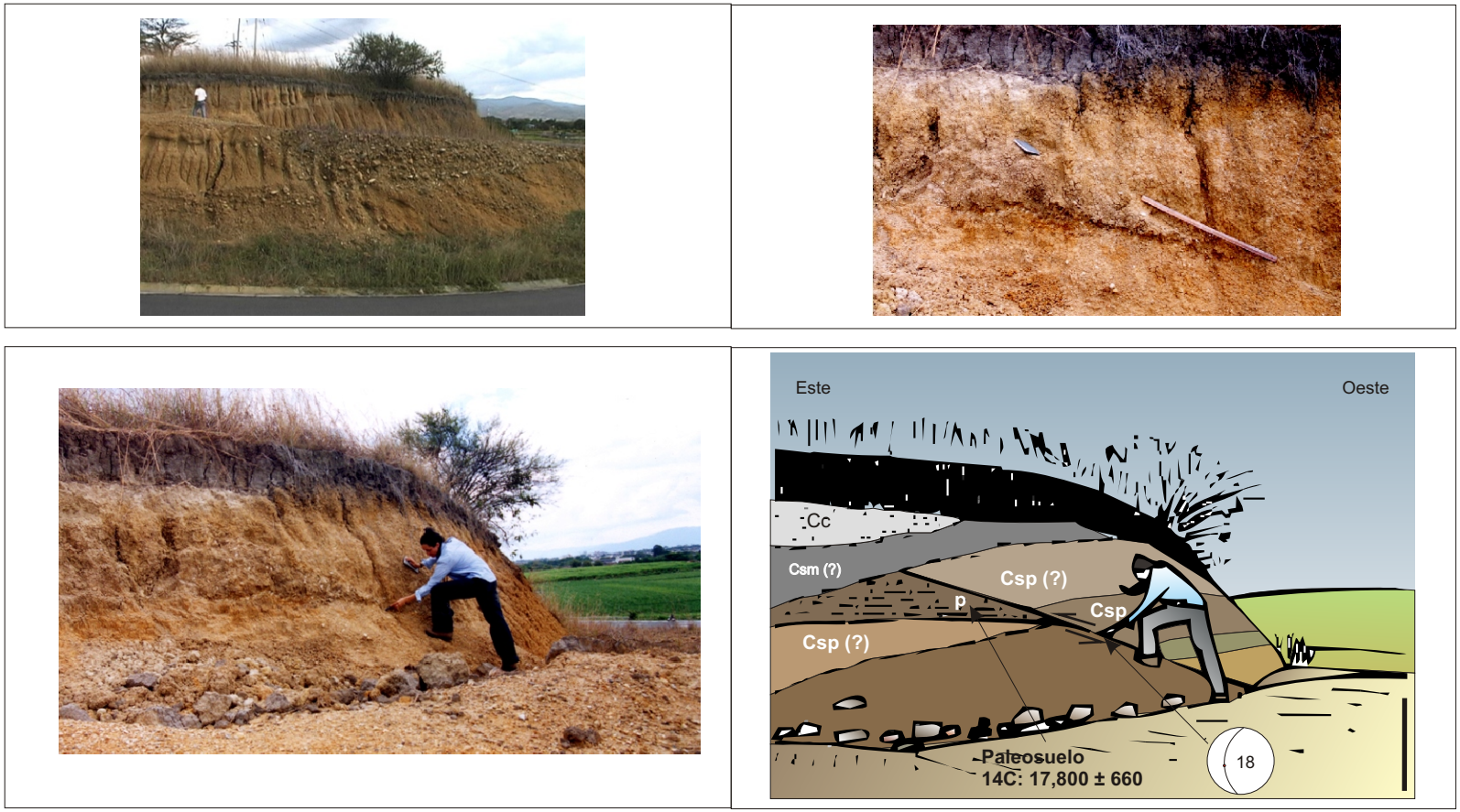


Figura 2. Afloramiento *Carreteable Oreja Norte.* Arriba izquierda vista desde el norte donde resalta la falla de vergencia este desplazando el nivel de gravas que suprayace en discordancia unidades de la Formación La Paila. Arriba derecha detalle del mismo plano de falla cortando la secuencia de sedimentos finos del Cuaternario y sobrecorriendo un paleosuelo (en color mas oscuro ubicado debajo de la escala de madera que mide 1m). En la fotografía inferior izquierda el mismo sector alejado. En la derecha se resaltan los niveles de arenas, cenizas y el paleosuelo sobrecorrido.

- Cara Norte Oreja

Sobre la misma colina con eje largo NS, unos 100 metros al sureste del afloramiento "Carreteable Oreja Norte" en la intersección circular construída para entrar a la ciudad de Tuluá, se hicieron dos cortes en la colina (cara norte y cara sur) (B y C en Figura 1). Allí se expusieron una serie de fallas que afectan unidades Cuaternarias (Figura 3). Estas fallas cortan, en secuencia hacia el este, a través de planos de estratificación de la Formación La Paila del Neógeno, formando un sistema imbricado. Los planos de las fallas son suavemente arqueados hacia abajo y disminuyen de buzamiento hacia el este. Cerca al borde oriental de la colina, una de las fallas (7 en Figura 3) intercepta la secuencia clástica del Cuaternario que suprayace en discordancia las unidades del Neógeno, el desplazamiento del horizonte Cg medido sobre el plano de falla es de 3m. Uno de los planos de falla del extremo oriental (8 en Figura 3) intercepta la secuencia clástica del Cuaternario que sobrecorre una cuña coluvial rica en materia orgánica. En este sitio, P en Figura 3, se muestreo un paleosuelo que fue datado en ^{14}C 12.820±40 a BP. Varios de los planos de estratificación medidos en las unidades del Neógeno muestran estrías verticales (Tabla 2), en la Figura 3 se muestran las proyecciones estereográficas. En este mismo afloramiento se reconocieron diques rellenos con material arcilloso. Un dique atraviesa los conglomerados de la Formación La Paila (dc Figura 3) en el bloque yacente. Pequeñas bolsas alargadas del mismo material se inyectaron a lo largo de los planos de falla, alcanzando las unidades del Cuaternario (i en Figura 3).

- Cara Sur Oreja

En la cara sur del intercambiador circular a Tuluá (C en Figura 1), se identificó la misma falla inversa de la Cara Norte cortando y desplazando 3 m el nivel de gravas basales del Cuaternario. En la Figura 4 resalta el plegamiento anterior de las unidades de la Formación La Paila (Tp), el fallamiento de los horizontes Csp y Cc y la concordancia de la topografía actual con la estructura. El fallamiento de Csp es mas evidente, también se sugiere que hubo fallamiento después de la depositación del horizonte Cc. El afloramiento hoy está cubierto con muro de concreto, el único punto de referencia que permanece es el tanque de agua en el tope del afloramiento.

- Variante Tuluá

Unos 250 metros al sur de los afloramientos del intercambiador circular de la via "Oreja Norte y Sur", un tramo de la variante Tuluá de orientación general N60W y 200 metros de longitud, corta la terminación occidental de la terraza del río Morales, en ambas caras de la vía se destaparon los afloramientos D y E en Figura 1. En esta secuencia Cuaternaria (Holocena) de pocos metros de espesor se evidencian variaciones laterales en el espesor de los sedimentos que denotan depositación sintectónica, las capas se adelgazan hacia la cresta de los pliegues de fallamiento y engrosan hacia los limbos. También se observan fallas tanto de vergencia al oeste como de vergencia al este (Figuras 5, 6 y 7).

El límite occidental de este corte de la Variante Tuluá, coincide geomorfológicamente con la terminación oeste de la terraza levantada del río Morales. En la cara norte de la vía (D en Figura 1) se evidencia el sutil plegamiento de los depósitos cuaternarios y arqueamiento de las superficie del terreno producto de la emergencia de una falla de vergencia al oeste, aquí también se midió el horizonte Cg desplazado 1 m por la falla y la propagación del plano afectando las capas de cenizas retransportadas (Cc) (Figura 7).

En la cara sur de la vía (E en Figura 1) se expone un paquete de areniscas y lodolitas de la Formación La Paila con un buzamiento general 30-45ºW. En estas unidades se midieron estrías paralelas a los planos de estratificación, N-S 25ºW con estría N80ºW contenida en el plano vertical y N-S 54ºW con pitch de estría 73ºS (Figura 6, Tabla 2). Estos datos revelan que los planos medidos son fallas de cabalgamiento con una mínima componente sinestral y dextral, respectivamente (Tabla 2). La falla más

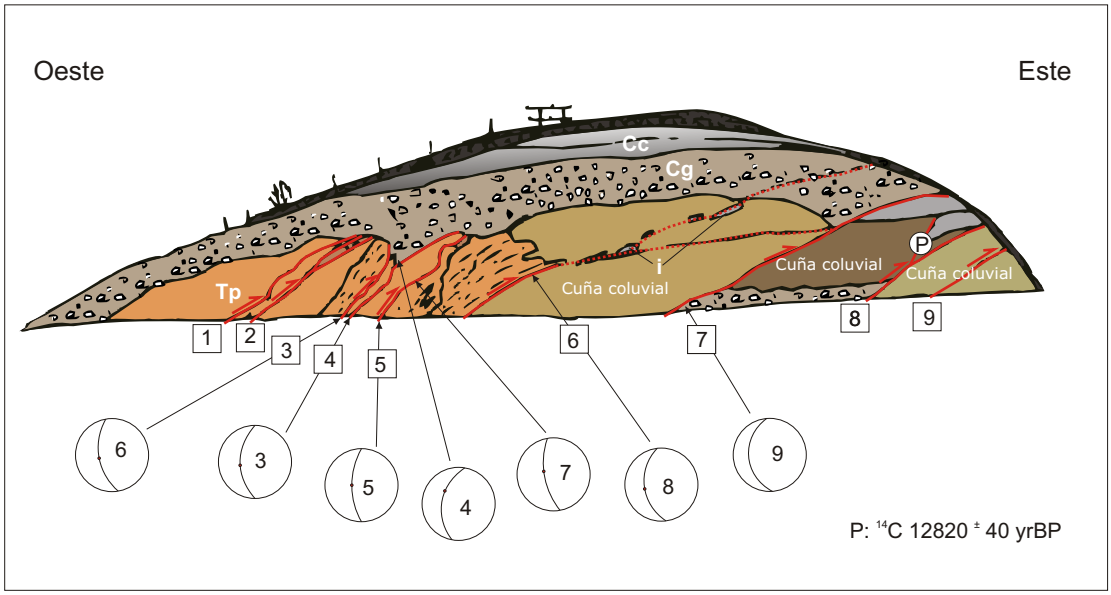


Figura 3. Afloramiento Cara Norte Oreja. Arriba y centro, Aspecto morfológico del escarpe y secuencia de fallas imbricadas (desde 1 hasta 9) que emergen a través de planos estratificación de la Formación La Paila (Tp) hasta alcanzar el horizonte de gravas (Cg) del Cuaternario. P: paleosuelo en cuña coluvial. Abajo, detalles del sitio donde se dató un paleosuelo (P), (i) estructuras de inyección. Los números dentro de las proyecciones estereográficas corresponden los datos consecutivos de fallas.

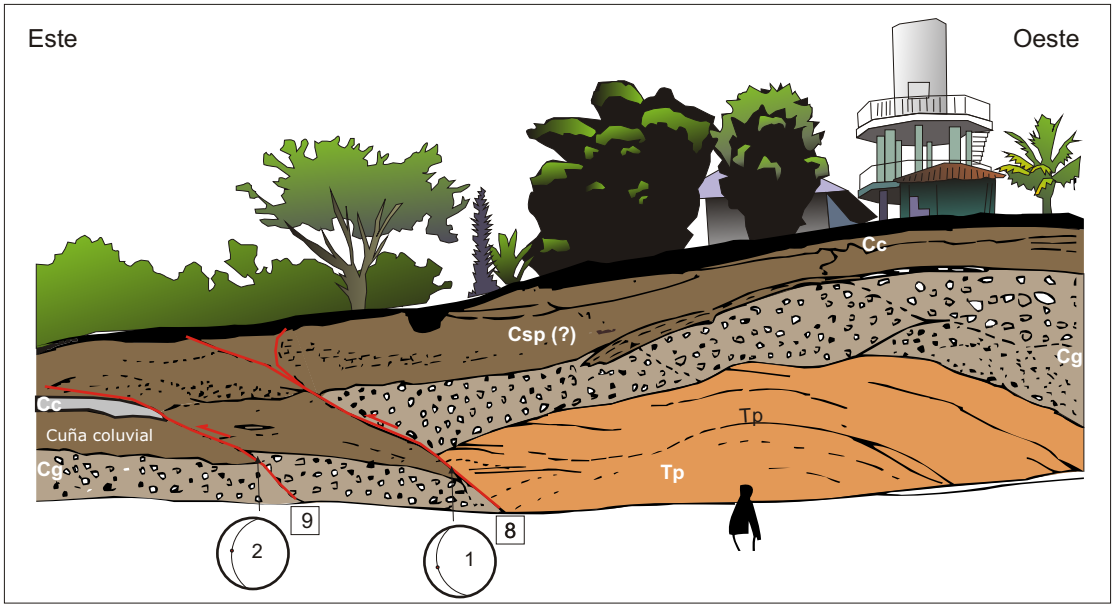


Figura 4. Afloramiento "Cara Sur Oreja", El nivel "guía" de gravas (Cg) que suprayace en discordancia las unidades de la Formación La Paila (Tp) es desplazado por fallas inversas de vergencia al este. En este sitio resalta el plegamiento de las unidades de la Formación La Paila y la concordancia de la topografía actual con la estructura. El desplazamiento a lo largo del plano de falla 7 es de 3 m. Corte N80W.

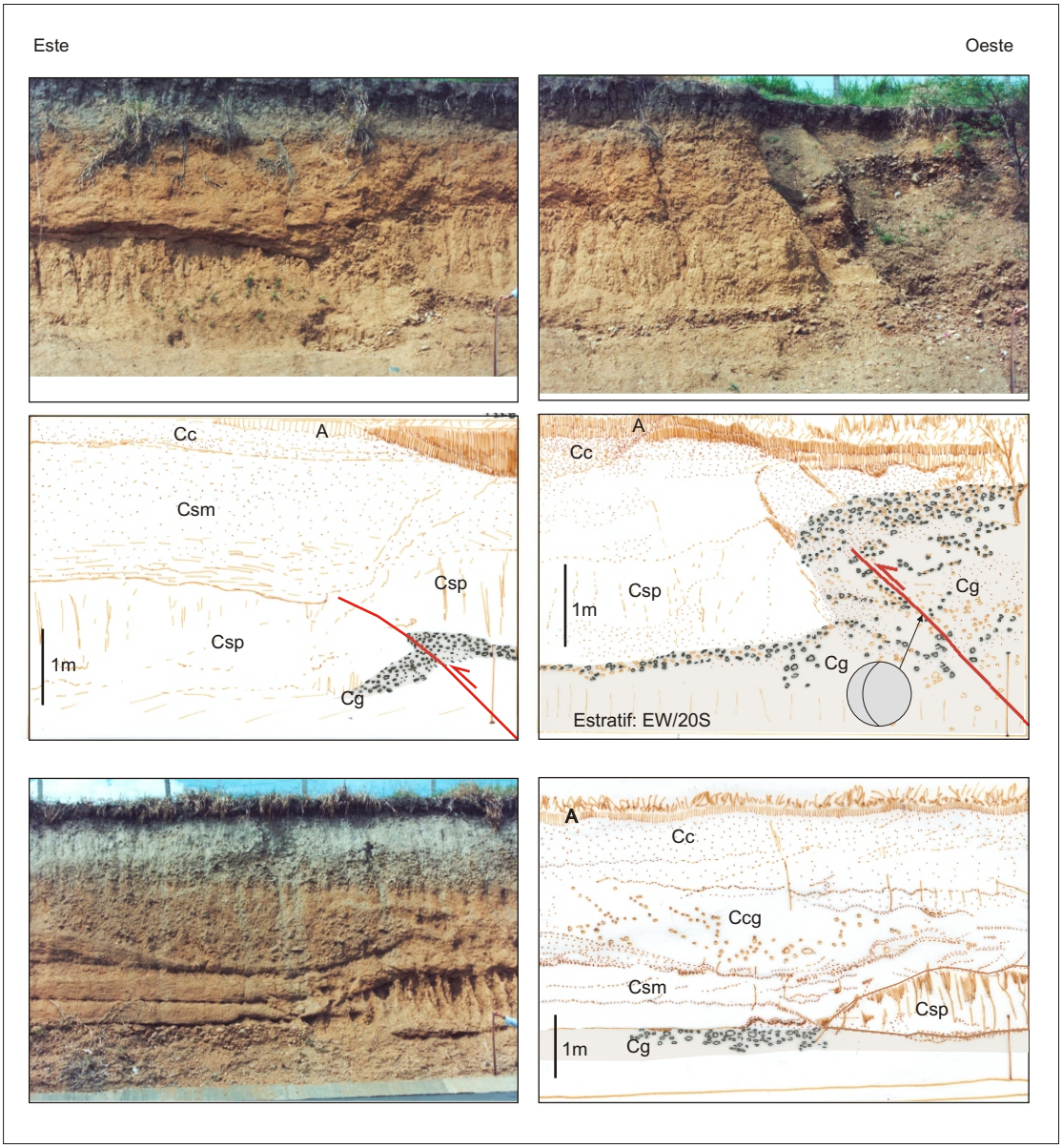
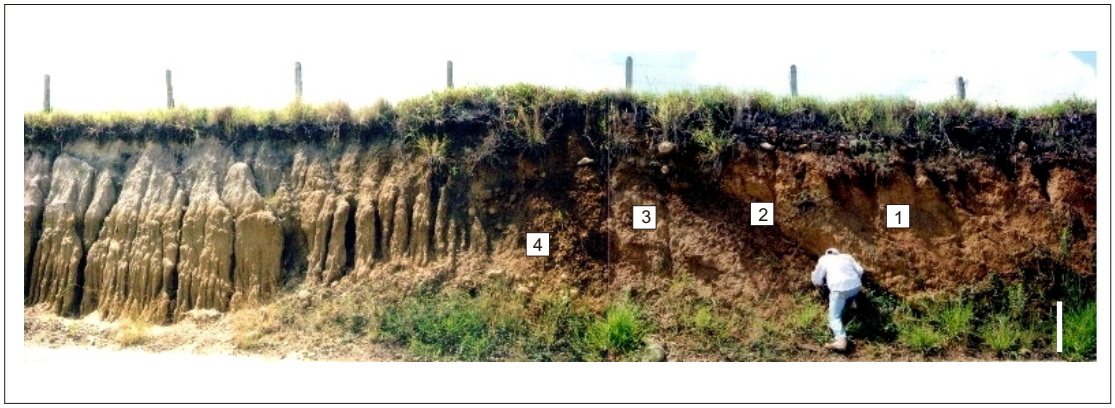
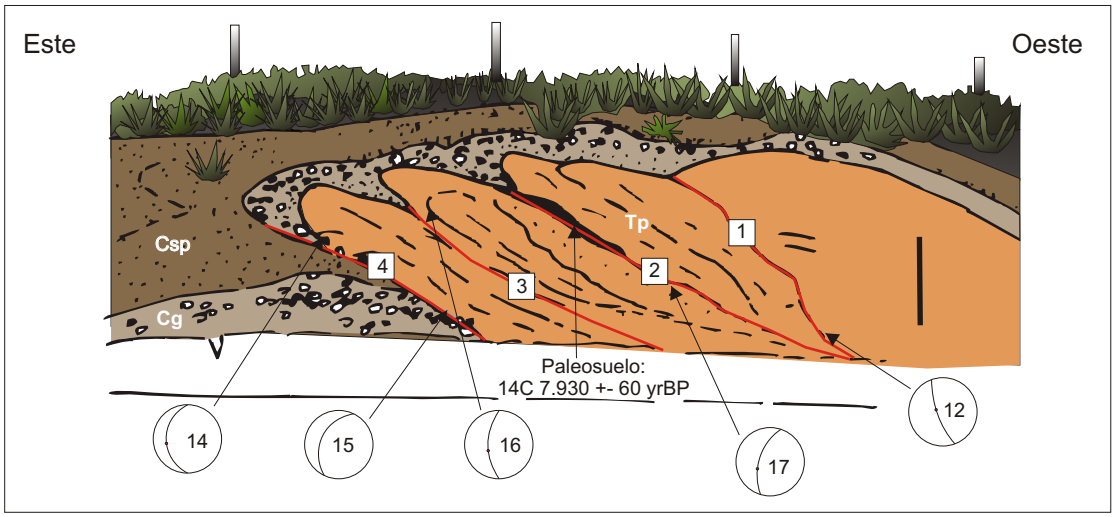


Figura 5. Afloramiento "Variante Tuluá-S". Arriba, las fotografías tomadas en el talud sur de la vía son continuas, ortogonales al talud y con mínimo traslape. En los esquemas se resalta el crecimiento progresivo de fallas de vergencia este, el engrosamiento de la capa Csp en el pie de la falla y el adelgazamiento en el eje de la charnela o en la pared colgante. Abajo, un poco mas al este de las anteriores la capa Csp se adelgaza en forma de cuña bajo Csm.





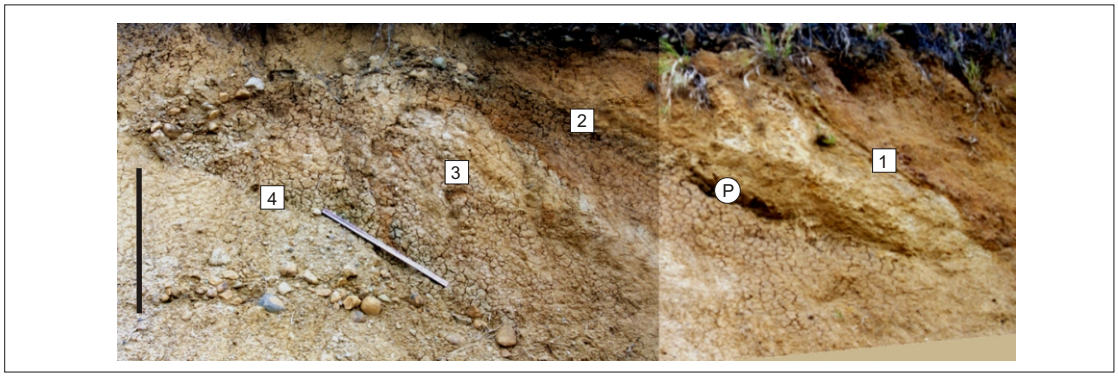
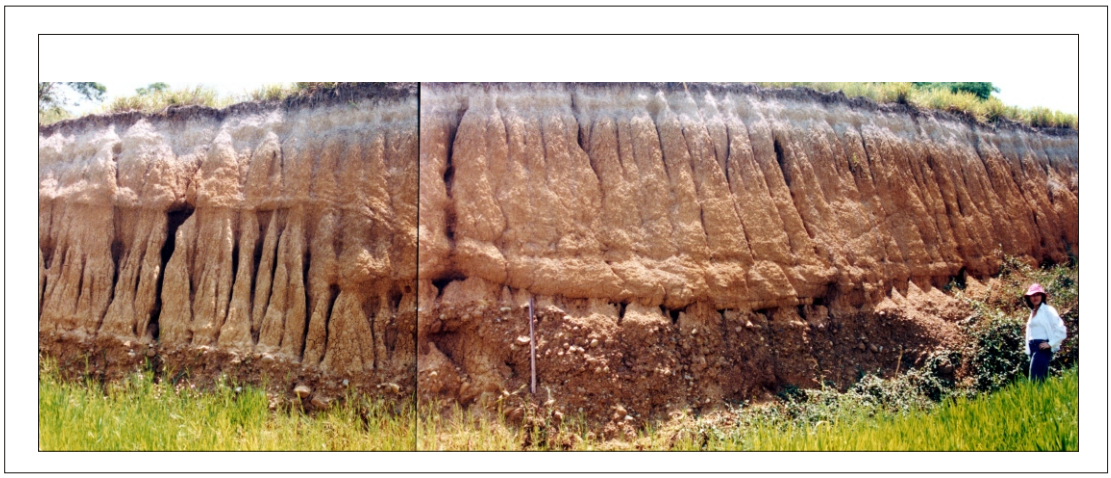


Figura 6. Afloramiento Variante Tuluá-S. El nivel de gravas suprayace en discordancia las unidades del Terciario y es afectado por fallas inversas de vergencia este que emergen en secuencia desde 1 hacia 4 a través de planos de estratificación de la Formación La Paila. (P) paleosuelo sobrecorrido por la falla. La fotografía superior fué tomada antes de limpiar el afloramiento. La escala mide un metro.



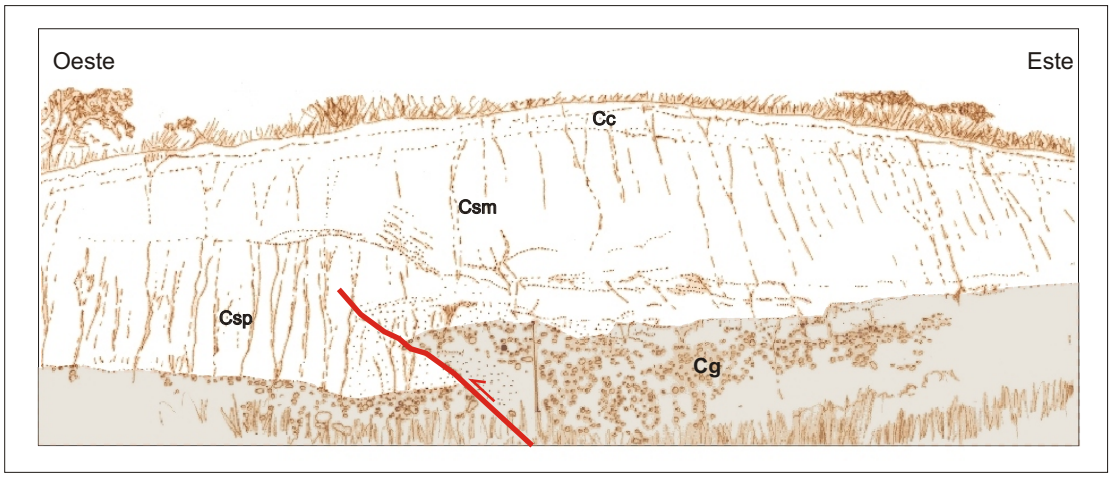


Figura 7. Afloramiento "Variante Tuluá-N". Corte en la cara norte de la vía. Una falla de dirección general NS y vergencia al oeste emerge plegando los depósitos superficiales, desplaza el nivel de gravas guía y se propaga hacia las capas de arenas (Csp, Csm). El horizonte Csp es engrosado en el seno del pliegue y delgado en la charnela.

oriental mostrada en la Figura 6 (planos 14 y 15) desplaza unos 3 m las gravas basales de la unidad Cuaternaria y una cuña de la falla rica en materia orgánica, esta cuña contiene algunos clastos de las gravas basales que cierran el tope del bloque superior de la falla (o bloque colgante) (p en Figura 6). Este relleno fue datado con radiocarbono en ^{14}C 7.930 ± 60 a BP.

El horizonte de gravas depositado en discordancia sobre las unidades del Neógeno (Formación La Paila) es la base de los depósitos de la terraza del Río Morales, los cuales se encuentran sobrecorridos por las fallas que a su vez afectaron el paleosuelo y que emergen a través de los planos de estratificación de la Formación La Paila. Bajo estas consideraciones el nivel de gravas basal está marcando el levantamiento principal de este sector del piedemonte, y sería posterior a 7000 años. Con base en las evidencias del afloramiento E se deduce que las unidades de la Formación La Paila estaban verticalizadas y peneplanizadas, se formó un paleosuelo durante un episodio de quietud y posteriormente con la reactivación el paleosuelo fue sobrecorrido por la falla, hubo tiempo para erosionar el horizonte que quedó expuesto en superficie antes de que se depositara las gravas basales de la secuencia cuaternaria.

Así, el plegamiento observado en los depósitos del Holoceno, en este caso representados en la secuencia de la Terraza del Río Morales, se debe a la propagación de fallas inversas que aprovechan los planos de estratificación de la Formación La Paila. Adicionalmente es evidente que la depositación de estos sedimentos ocurrió simultáneamente con la acción de estas estructuras. Por otro lado el bajo ángulo que muestran las fallas de vergencia al este también indica que la zona de despegue debe estar relativamente cerca de la superficie, es decir hay una estructura principal con un ángulo aún más bajo que avanza hacia la Cordillera Occidental, de la cual se desprenden retrocabalgamientos en respuesta al continuo transporte tectónico regional. Esta estructura regional se ajusta al comportamiento de la *Cuña Subcrítica de Coulomb*. Este modelo permite explicar la generación de los retrocabalgamientos como una forma de resolver el continuado transporte tectónico hacia el oeste.

- **Trinchera El Ahorcado**

El sexto afloramiento localizado al Sureste de Tuluá, fue encontrado durante los trabajos de campo visitando los escarpes identificados con el análisis geomorfológico. En el momento de la visita al escarpe El Ahorcado estaba en construcción una trinchera para acometida de redes de alcantarillado de una nueva urbanización. La trinchera tenía una profundidad de 1.5 m y 100 m de longitud, se construía perpendicular y en el pie del escarpe El Ahorcado (Figura 8). En el extremo oriental de la trinchera, en un tramo de 6 metros se expuso la estratigrafía de dos cuñas coluviales intercaladas entre paleosuelos ricos en materia orgánica y el suelo actual (Figura 9). De base a techo la secuencia expuesta sobre la terraza es la siguiente:

Horizonte As: Arcilla de color negro. Corresponde a la formación del suelo actual. En la base de este horizonte se dató el paleosuelo en 5770 ± 130 a BP (P6 en Figura 9).

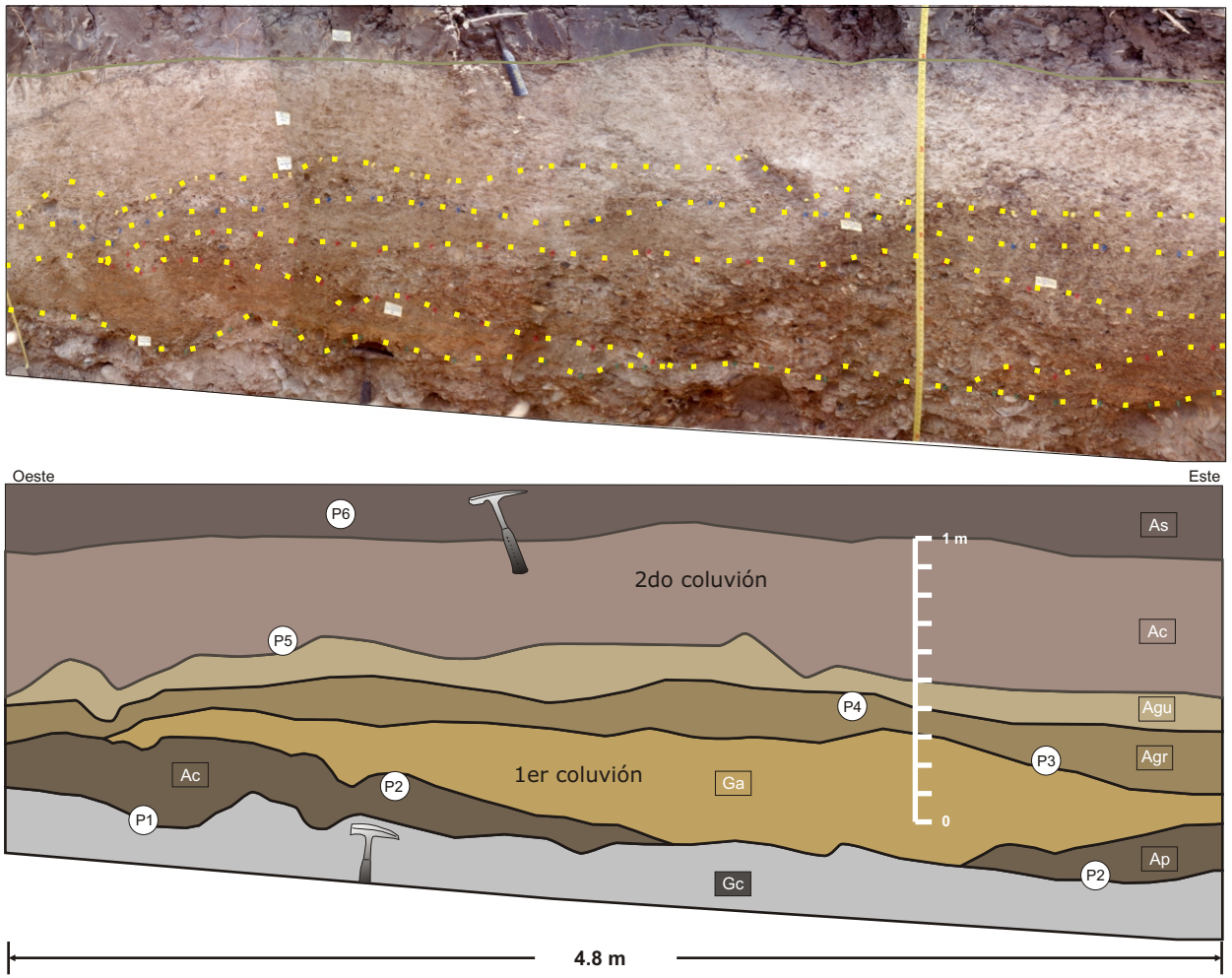
Horizonte Ac: Arcilla gris clara. Por su similitud con el horizonte Cc encontrado en la variante Tuluá se presume que el horizonte tiene contenido de material volcánico.

Horizonte Agu: Arcilla gris clara, con guijos angulosos en proporción del 50%. Este horizonte se interpreta como un evento de coluviación. El techo de este horizonte se dató en 22.000 ± 160 a BP (P5 en Figura 9).

Horizonte Agr: Arcilla de color café con gravas en proporción del 40%. Este horizonte se interpreta como un evento de coluviación. El techo de este horizonte se dató en 21.500 ± 330 a BP (P4 en Figura 9).

Horizonte Ga: Gravas y guijos angulosos envueltos en una matriz arcillosa de color café. La proporción de la arcilla es del 15%. El techo de este horizonte se dató en 7.460 ± 330 a BP (P3 en Figura 9).

Figura 8. Arriba: Expresión morfológica del escarpe *El Ahorcado*. Abajo izquierda, trinchera excavada en dirección oeste - este para una acometida de servicios públicos; al fondo la 14 de Tuluá; sobre el extremo este en la cara norte se documentó la cuña coluvial. Abajo derecha, con tachuelas de colores señalados los diferentes horizontes de la cuña coluvial.



As: Arcilla negra

Ac: Arcilla gis clara

Agu: Arcilla gris clara con guijos angulosos en proporción del 50%

Agr: Arcilla café con gravas en proporción del 40%

Ga: Gravas angulosas envueltas en matríz arcillosa cafe en proporción del 15%

Ap: Paleosuelo café oscuro

Gc: Gravas subredondeadas clastosoportadas con diámetros máximos de 40 cm

P6: ^{14}C 5770 ± 130 YBP

P5: ^{14}C 22.000 ± 160 YBP

P4: ^{14}C 21.500 ± 330 YBP

P3: ^{14}C 7.460 ± 330 YBP

P2: ^{14}C 17.900 ± 130 YBP

P1: ^{14}C 13.070 ± 80 YBP

Figura 9. Trinchera El Ahorcado. En el piso de la trinchera el horizonte Gc representa el tope de la terraza. El paleosuelo P1 postdata la terraza. El paleosuelo P6 representa el inicio de formación del suelo actual.

Horizonte Ap: Arcilla de color café oscuro. El techo de este horizonte se dató en 17.900 ± 130 a BP. La base de este horizonte se dató en 13.070 ± 080 a BP.

Horizonte Gc: Gravas subredondeadas y clastos con diámetros que alcanzan los 40 cm de diámetro. Este horizonte se interpreta como el tope de la terraza.

Los paleosuelos que se encuentran intercalados en las cuñas, muestran edades del Pleistoceno-Holoceno que en apariencia no se ajustan a una secuencia cronológica convencional de juventud hacia el techo (Paleosuelos 2, 3 y 4 en Figura 9). Sin embargo, los paleosuelos que limitan las cuñas (p1 inferior) (p3 intermedio) y (p6 superior), formados in situ, muestran la edad más antigua y el más joven respectivamente. Se entiende entonces que las cuñas coluviales formadas por episodios de erosión, que en este caso incluyen paleosuelos retrabajados en el pié del.
escarpe de la falla, acumulen materiales más recientes de base a techo. Este sitio se interpreta como evidencia de exhumación y una incisión progresiva desde el tope del escarpe El Ahorcado generada durante un incremento de la flexión o crecimiento vertical de la bloque colgante, pegada a la deformación cosísmica a lo largo de la falla de cabalgamiento. En su lugar, los paleosuelos se generaron durante períodos inter-sísmicos del ciclo de la falla, mientas que ésta acumula esfuerzo elástico. En consecuencia, los dos últimos eventos ocurrieron justo antes del enterramiento de los paleosuelos más antiguos (p2, p4 y p5), por las cuñas coluviales. Los paleosuelos formados insitu (p1, p3 y p6) fueron datados en ^{14}C 13.070 ± 80 a BP y ^{14}C 7.460 ± 330 a BP, indicando que los terremotos ocurrieron al rededor de los 13.000 y 12.000 años y entre 7.000 y 6.000 años BP. Este período de retorno está acorde, por lo menos, con el tiempo de formación del suelo actual, el cual inició en hace aproximadamente 5.000 años.

- **Margen izquierda Río Tuluá**

El septimo afloramiento de la estructura, localizado al Sureste de la ciudad de Tuluá, es un corte natural del río Tuluá en su margen izquierda, que disecta una colina abombada con eje largo NS limitada por escarpes con cara hacia el este y hacia el oeste. La base del escarpe que mira hacia el este, es notoria por la presencia de una gotera tectónica y un patrón de drenaje en rastrillo. Este escarpe se forma en la terminación norte de un abombamiento de tendencia general NS. En este sector el talud de erosión de la margen izquierda del Río Tuluá tiene una decena de metros de altura, y aunque está cubierto por vegetación, gracias a un pequeño deslizamiento se expuso una falla inversa de tendencia general NS que corta toda la pared, con buzamiento intermedio y vergencia al Oeste, en el sitio 1 señalado en la Figura 10 se identificaron pliegues de arrastre en un horizonte de gravas. Otro detalle existente a lo largo del plano de falla observado en el sitio 2 de la Figura 10, y más cerca de la superficie del terreno es un pequeño retrocabalgamiento de vergencia oeste que en conjunto con la falla principal forman una estructura en pop-up de escala mesoscópica. Este pequeño pop-up y la morfología de la colina son muy similares al escarpe Oreja. Su geometría también sustenta la estructura que genera el abombamiento de la colina, donde ambos escarpes son el resultado de la flexura de las unidades por la emergencia de la falla de cabalgamiento principal de vergencia al oeste y el retrocabalgamiento. Hacia el este de la colina existe otra colina abombada, entre ambas se forma una depresión que se interpreta como una gotera tectónica formada por el peso del escarpe del retrocabalgamiento. El río Tuluá que corre al Norte de estas colina se comporta como un drenaje antecedente.

Debido a las condiciones del afloramiento, es difícil decir cuál es la unidad sedimentaria que está cortada en este sector. Sin embargo, la ausencia de colores verdosos en la secuencia aluvial características de la Formación La Paila, y las evidencias en el tope de la colina donde hay grietas rellenas con sedimentos, sugieren que la unidad aluvial es más joven, quizás de edad Cuaternaria.

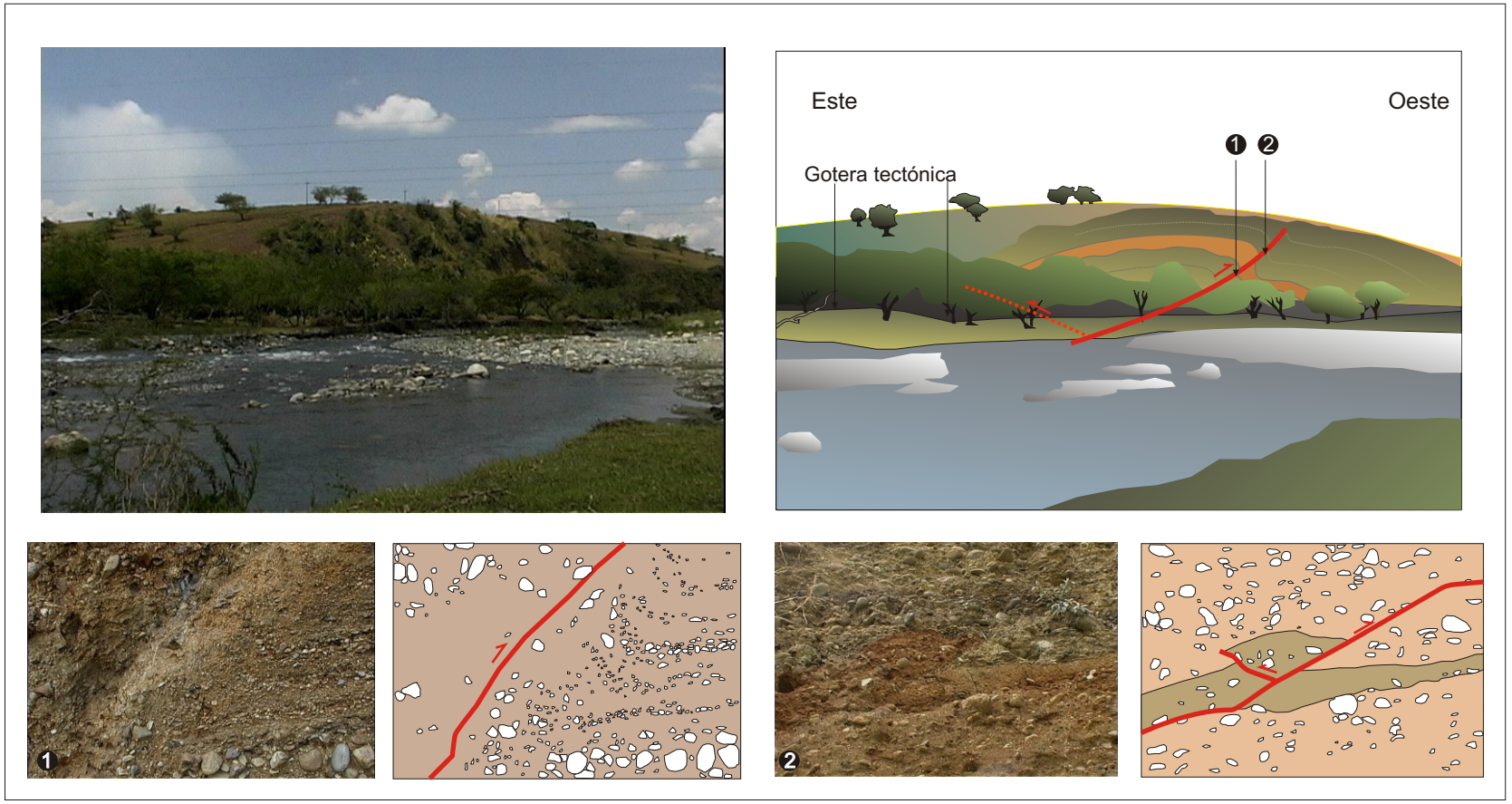


Figura 10. Escarpe Sur Río Tuluá. Arriba emergencia de falla inversa de vergencia oeste. En el dibujo interpretativo se muestra una falla de vergencia al este. El conjunto de ambas estructuras forma la colina de presión. En las figuras de abajo detalles de la falla 1 donde se muestran pliegues de arrastre (1) que confirman el carácter inverso de esta estructura. A la derecha un pop-up de escala centimetrica (2) formado al parecer en un paleosuelo.

Sector Saliente de Sonso

- **Cantera El Vínculo**

En la Cantera El Vínculo, situada en un costado de la carretera Buga-Palmira, se encontraron afloramientos nuevos gracias a los trabajos realizados dentro de la Malla Vial del Departamento del Valle del Cauca, durante el año 2005. Esta cantera se ubica en la terminación sur de la "Saliente de Buga" la cual forma parte de los escarpes que se desprenden desde Andalucía hasta Sonso constituyendo la rampa frontal del frente inverso que se documenta en este trabajo, y que ha sido reportado en trabajos anteriores (López et al. (2002; 2003). La estructura más importante en este sector es el Anticlinal de Sonso (McCourt, 1984). Los flancos de este pliegue de tendencia general NNE desaparecen bajo depósitos Cuaternarios.

En este lugar las unidades implicadas son los depósitos de origen fluvial de la Formación La Paila (Tp) de edad Mioceno Superior y depósitos de abanicos recientes (Qs). La Formación La Paila está constituida por litoarenitas de colores marrón claro a marrón rojizo intercaladas con conglomerados matriz soportados con clastos que muestran imbricación frecuente. Los niveles conglomeráticos tienden a ser lenticulares y frecuentemente muestran bases erosivas junto con estructuras canaliformes dentro de los cuales predomina la estratificación inclinada. El tamaño máximo de los cantos es cercano a los 20 cm, su composición es usualmente máfica con predominio de gabros y anfibolitas (?); ocasionalmente pueden observarse fragmentos de rocas sedimentarias. Las areniscas muestran estratificación difusa, en algunos de estos niveles son frecuentes calcretas o caliches nodulares y en forma de láminas (en planos de diaclasas y fallas) (Figura 11). Un rasgo notorio dentro de la Formación La Paila en la Cantera El Vínculo es la aparición de superficies erosivas separadas por discordancias angulares y paraconformidades.

Los depósitos cuaternarios están conformados por gravas inconsolidadas con estructura clastosoportada masiva compuestas por clastos de rocas sedimentarias y básicas. Estos depósitos se disponen en paraconformidad sobre el eje del anticlinal y en discordancia angular hacia el flanco occidental del Anticlinal de Sonso.

Dentro de la cantera se levantó una poligonal con brújula y distanciómetro que sirvió para localizar las principales estructuras (Figura 12 y Tabla 3): fallas inversas, fallas normales, fallas de rumbo, plegamiento anticlinal y monoclinal, sin y post-depositacional y superficies de erosión que podrían llegar hasta orden 6 (ver Miall, 1996). Los puntos donde se tomaron datos estructurales se localizaron con GPS.

Figura 11. Izquierda, conglomerados de la Formación La Paila en la Cantera El Vínculo. ga: gabros, bs: basaltos. Derecha, estratos de arenitas líticas con laminas de caliche (ca) rellenando fracturas. La barra representa 10 cm.

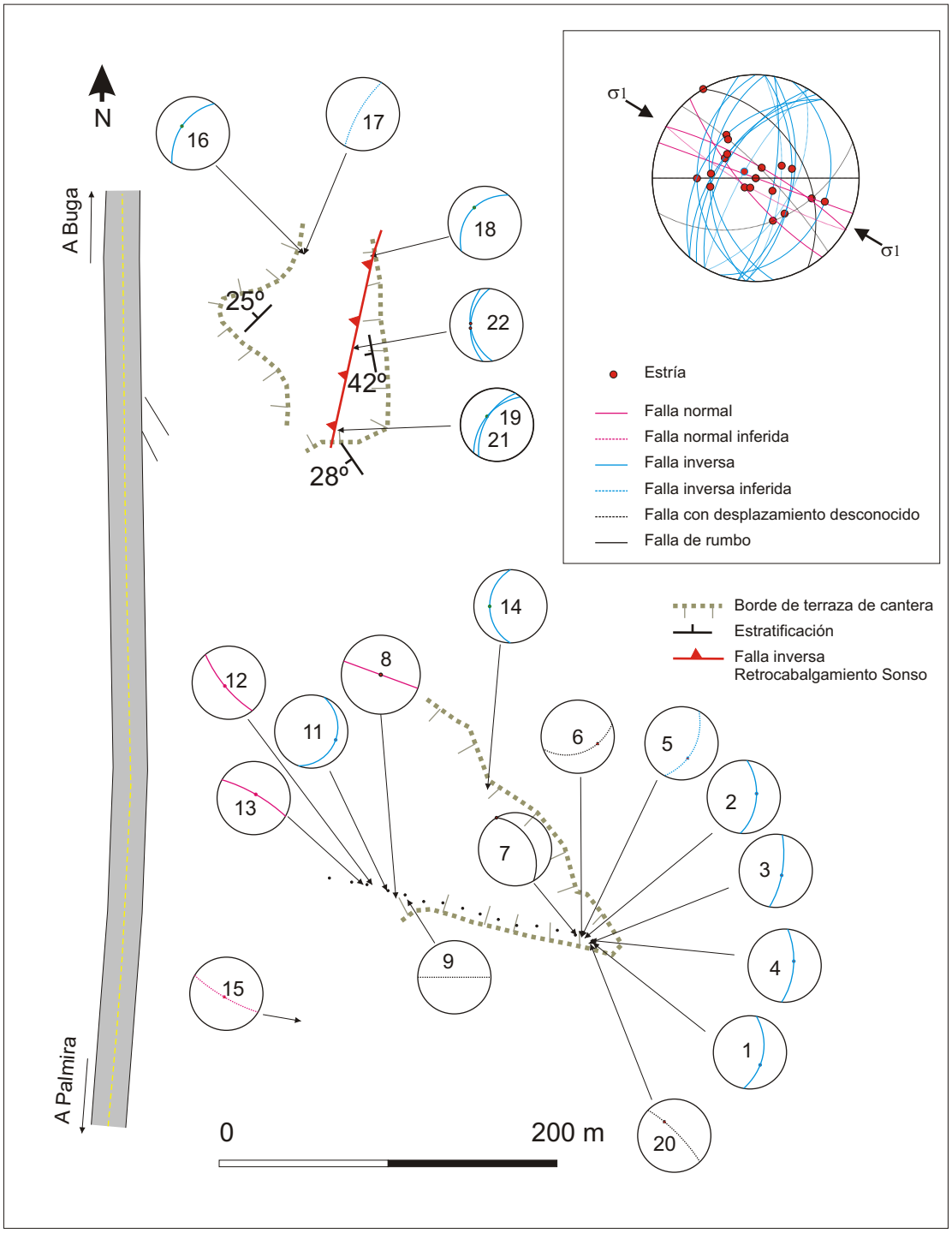


Figura 12. Localización de las fallas reconocidas en la Cantera El Vínculo representadas con sus proyecciones estereográficas individuales. Arriba, a la derecha: proyecciones totales. Los números corresponden a datos consecutivos de las fallas

Tabla 3. Datos estructurales Cantera El Vínculo

Número	Plano de falla	Plunge de Estría	Componentes desplazamiento
1	N10E/50E	42S	Inversa sinestral
2	N5E/52E	50E	Inversa
3	N10E/70E	68W	Inversa sinestral
4	N5E/62E	58E	Inversa dextral
5	N28E/50E	42S	Inversa sinestral
6	N70E/42E	30E	Horizontal con componente vertical
7	N30W/40E	0	* Horizontal
8	N70W/90	90	Normal
9	EW/90	90	Desconocido
10	EW/90		Desconocido
11	N20E/20E	20E	Inversa
12	N40W/74W	74W	Normal
13	N60W/78E	78E	Normal
14	NS/30W	30W	Normal
15	N60W/78S	78S	Vertical
16	N35E/50W	50W	Inversa
17	N30E/75N	75N	Vertical
18	N40E/37N	36N	Inversa
19	N40E/50N	50W	Inversa
20	N45W/78E	40N	Horizontal con componente vertical
21	N30E/54N		Inversa
22	N5E/42W	42W	Inversa

* para el tratamiento de los datos se asume que el desplazamiento horizontal es dextral

- **Fallas inversas**

Estas estructuras tienen una dirección general NNE con inclinaciones tanto al este como al oeste (Figura 13, Figura 14 y Figura 15). Las fallas de vergencia al este se consideran retrocabalgamientos dada la vergencia del anticlinal. Algunas de estas fallas no atraviesan todas las superficies límite, lo que indica que los esfuerzos que las produjeron no han actuado de manera continua en el tiempo. La presencia de ambas vergencias en este grupo de fallas indica un sistema conjugado, siendo las fallas de vergencia al oeste, fallas sintéticas. Estas fallas probablemente están asociadas a un sistema principal oculto bajo sedimentos Cuaternarios en el flanco oeste del Anticlinal de Sonso.

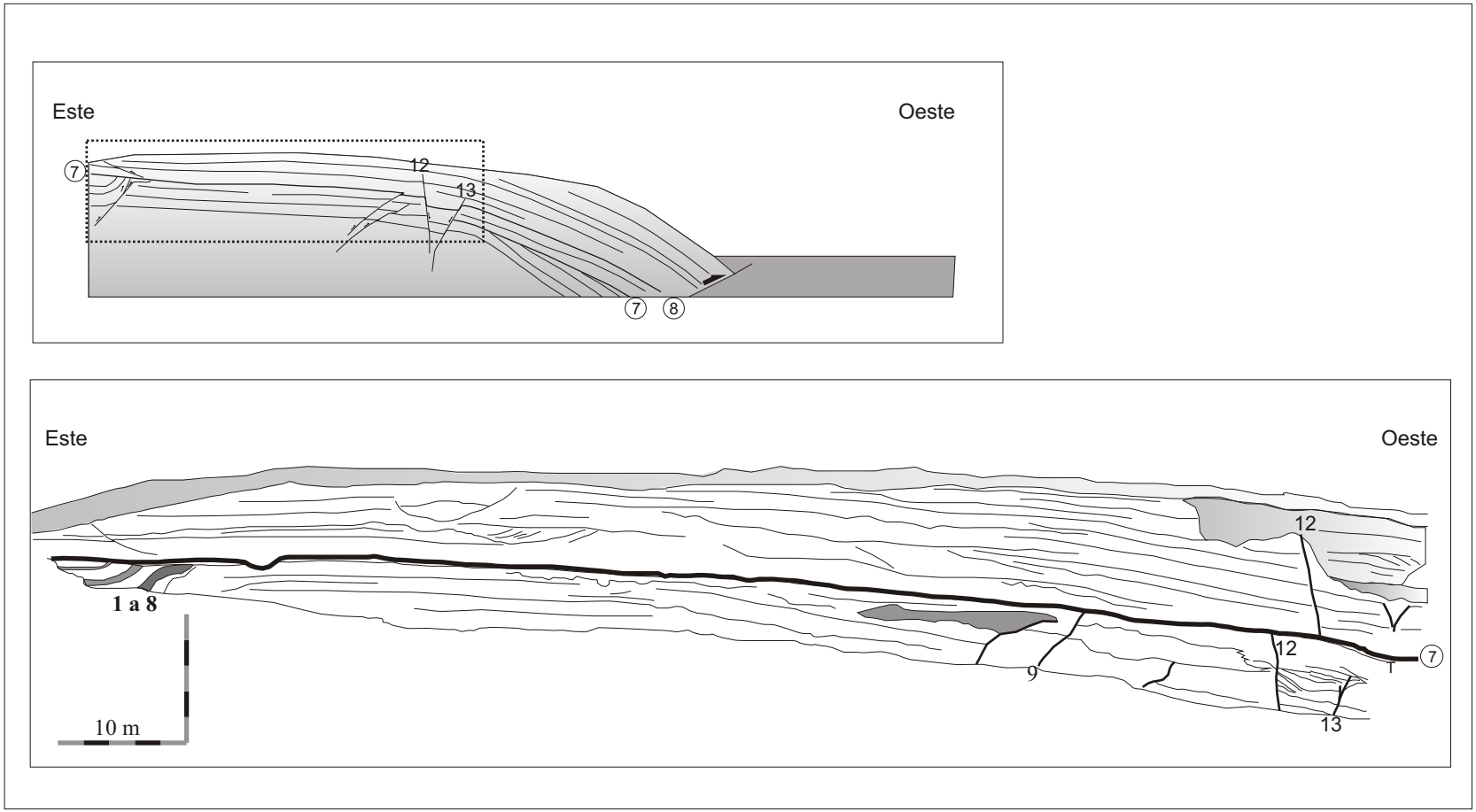


Figura 13. Arriba, Anticlinal de Sonso tal como aparece en la cantera El Vinculo. Abajo, detalle del sector señalado en el recuadro arriba. Se resalta la posición de las fallas normales con respecto a la flexura principal del anticlinal. Las fallas inversas están distribuidas a través de toda la estructura. También son notorias las superficies de orden 7 y 8 (números encerrados en circulo) que fosilizan algunas fallas y pliegues.

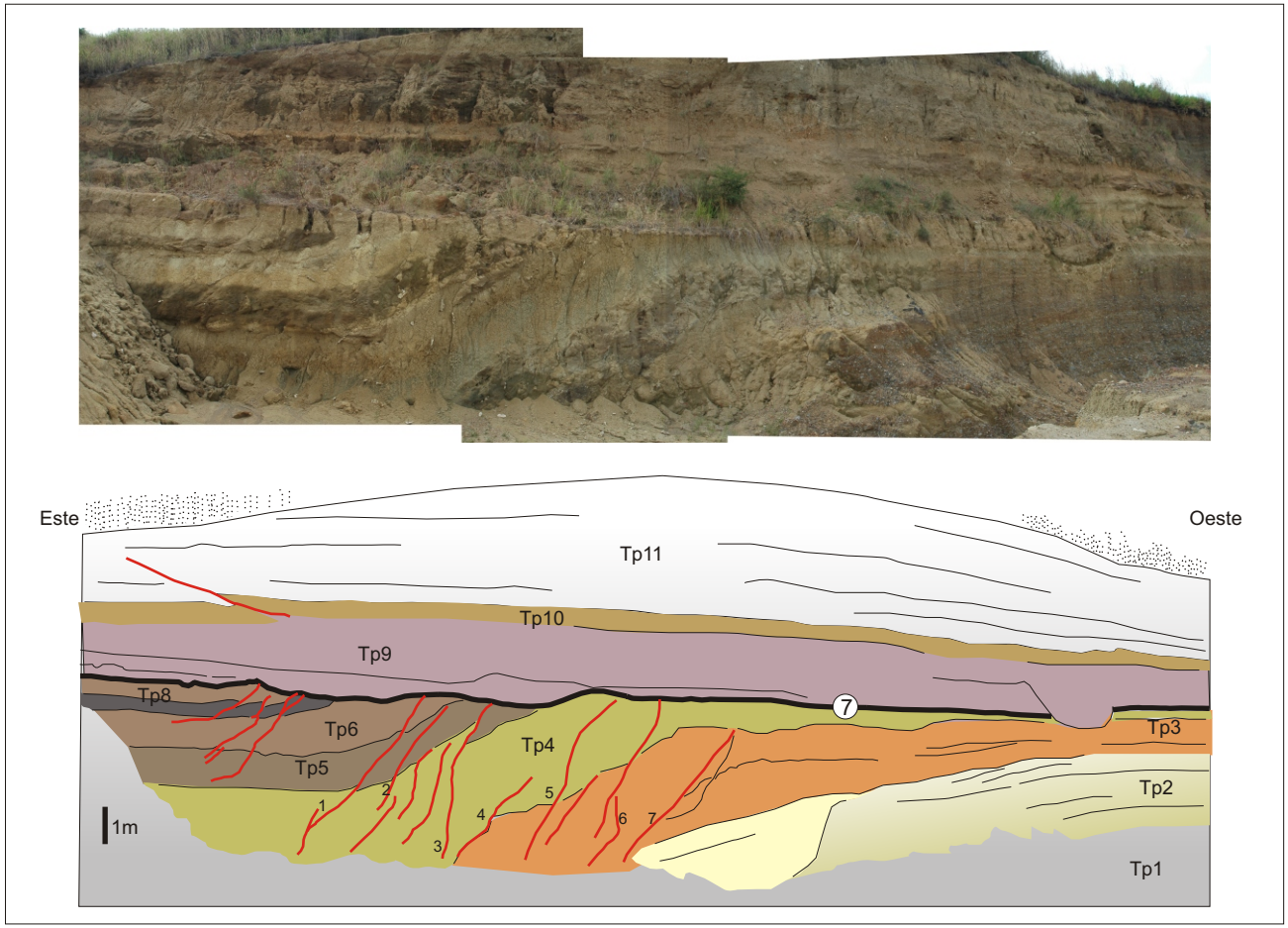


Figura 14. Detalle de la Figura 27 en el costado este de la Cantera El Vinculo. Plegamiento monoclinal. Las lodolitas y arenitas (Tp4 a Tp8) aparecen en discordancia en el flanco hundido de la estructura. A la derecha de la fotografía las secuencias son paraconformes, por tanto la superficie generada podría corresponder a un orden 7 o mayor. Asociado al plegamiento existen una serie de fallas menores principalmente inversas (números 1 a 7).

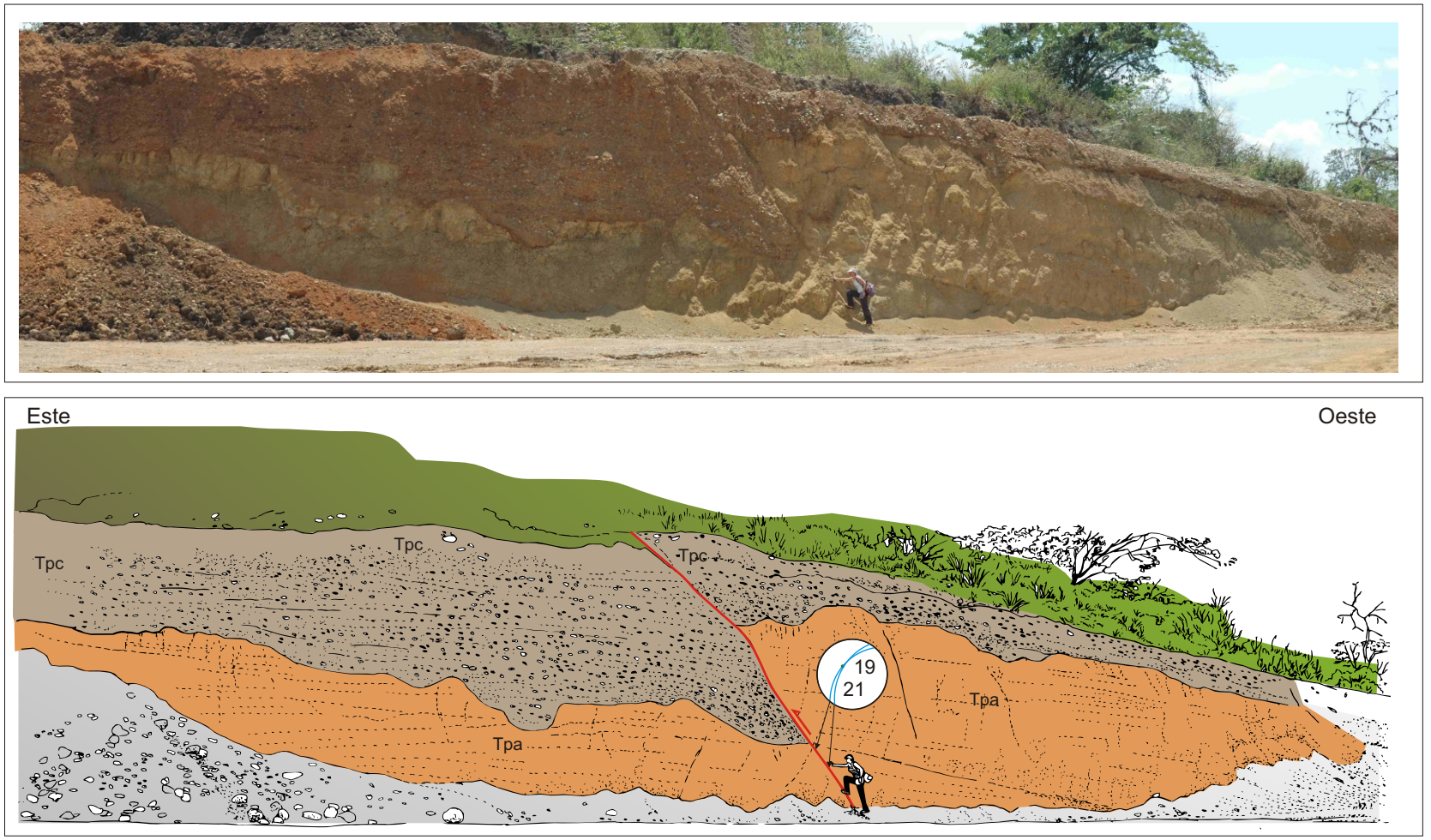


Figura 15. Retrocabalgamiento Sonso (datos de falla 19 y 21). Tpc y Tpa corresponden a sedimentos de la Formación La Paila. Hacia la base niveles de areniscas de color pardo (naranja en el esquema de abajo) suprayacidos por niveles de gravas (Tpc) estratificadas con estructuras de erosión en la base. El desplazamiento neto es cercano a los 3 metros.

En este sitio de la cantera se pudo evidenciar que algunas fallas inversas aprovecharon planos de fallas normales preexistentes. En la Figura 16, tomada en uno de los cortes de la cantera, de dirección NS, se encontró que el plano de la falla 14 muestra desplazamiento tanto normal como inverso a lo largo del plano. El desplazamiento normal es más evidente hacia la parte baja del afloramiento, donde capas de arenitas conglomeráticas tienen un desplazamiento normal cercano a los 80cm, por otro lado hacia la parte superior niveles de caliche muestran un desplazamiento o deformación de carácter inverso. Adicionalmente el nivel de areniscas conglomeráticas (Tp2 en Figura 16) muestra un engrosamiento en la pared colgante lo que indica que la sedimentación fue activa durante el fallamiento normal. Los depósitos Qs (de edad sugerida cuaternaria) son los más recientes afectados por la falla.

Una estructura que pudo seguirse durante los trabajos de excavación de la cantera fue el "retrocabalgamiento de Sonso" (datos de fallas 18, 19, 21 y 22 en Figura 12) que es una estructura con dirección general NNE y vergencia al este. Esta estructura corta depósitos cuaternarios tal como se ve en las Figuras 47 y 49 y por tanto es una de las más recientes en la Cantera El Vínculo.

El desplazamiento de esta falla es más de cuatro metros como se deduce por la posición de las capas de la Formación La Paila (Tp) a ambos lados de la falla en el sitio del dato 22 (Figuras 44). Además el movimiento más reciente de esta falla puede deducirse por el sobrecorrimiento de los depósitos cuaternarios (Qs) que en este caso es cercano a un metro. Este desplazamiento es de magnitud similar al que muestra este mismo retrocabalgamiento un poco más al sur (ver Figura 15, datos de fallas 19 y 21).

En la mayor parte de las fallas inversas se determinaron superficies estriadas y desplazamientos de los estratos que permitieron determinar la vergencia. En el Retrocabalgamiento de Sonso se encontraron indicadores adicionales como fueron sombras de arcilla en guijarros dispuestos sobre la superficie de falla (ver Figura 17). Otras fallas sin indicadores cinemáticos claros o con ambigüedad en los desplazamientos de los estratos se dejaron como "fallas con desplazamiento desconocido"; en algunas fallas se observaron desplazamientos aparentes que sugieren deslizamientos inversos por tal razón se tienen en cuenta como "fallas inversas inferidas" (Figura 12).

La dirección dominante de las fallas inversas en la Cantera El Vínculo es NNE sugiriendo un esfuerzo principal (σ_1) en dirección WNW, dirección de esfuerzo que es perpendicular al eje del Anticlinal de Sonso.

- **Fallas normales**

Estas fallas están orientadas transversalmente a las fallas inversas (Figura 13). Cuando están conjugadas forman pequeños grabenes. El graben entre las fallas 12 y 13 fue formado en dos fases. La falla 13 es la más antigua de las dos, ya que es cortada por una superficie de estratificación que la fosiliza y cubierta por los sedimentos arenosos (Tp_4 en Figura 18). Adicionalmente este nivel es cortado por la falla 12, la mas reciente de esta estructura. Lo anterior sugiere que en un principio solo existió un semigraben recostado al oeste contra la falla 13, con acumulación de barras de gravas y arenas hacia esta dirección como se ve en los niveles Tp3. La presencia de niveles de gravas suavemente plegadas dentro del graben no solamente sugiere deformación por tectónica sino la acumulación de detritos hacia el flanco hundido de la falla (13 en Figura 13 y Figura 18). Esto muestra con claridad que durante la depositación de la Formación La Paila existió una tectónica activa. Estos detalles son consistentes con observaciones en el Sector Bugalagrande, en el flanco oeste del Anticlinal de Andalucía donde existe un fallamiento sintectónico de tipo normal en la Formación La Paila.

Existen dos explicaciones que no son excluyentes para el fallamiento normal en la Cantera El Vínculo, la primera es que el fallamiento normal sea el resultado de la formación de pliegues anticlinales, es decir fallas de momento de plegamiento, la segunda es que exista un fallamiento normal antecedente previo a la fase compresiva reciente. La primera hipótesis es muy factible cuando se observa en el análisis estereográfico que algunas de las fallas normales son aproximadamente perpendiculares a las fallas

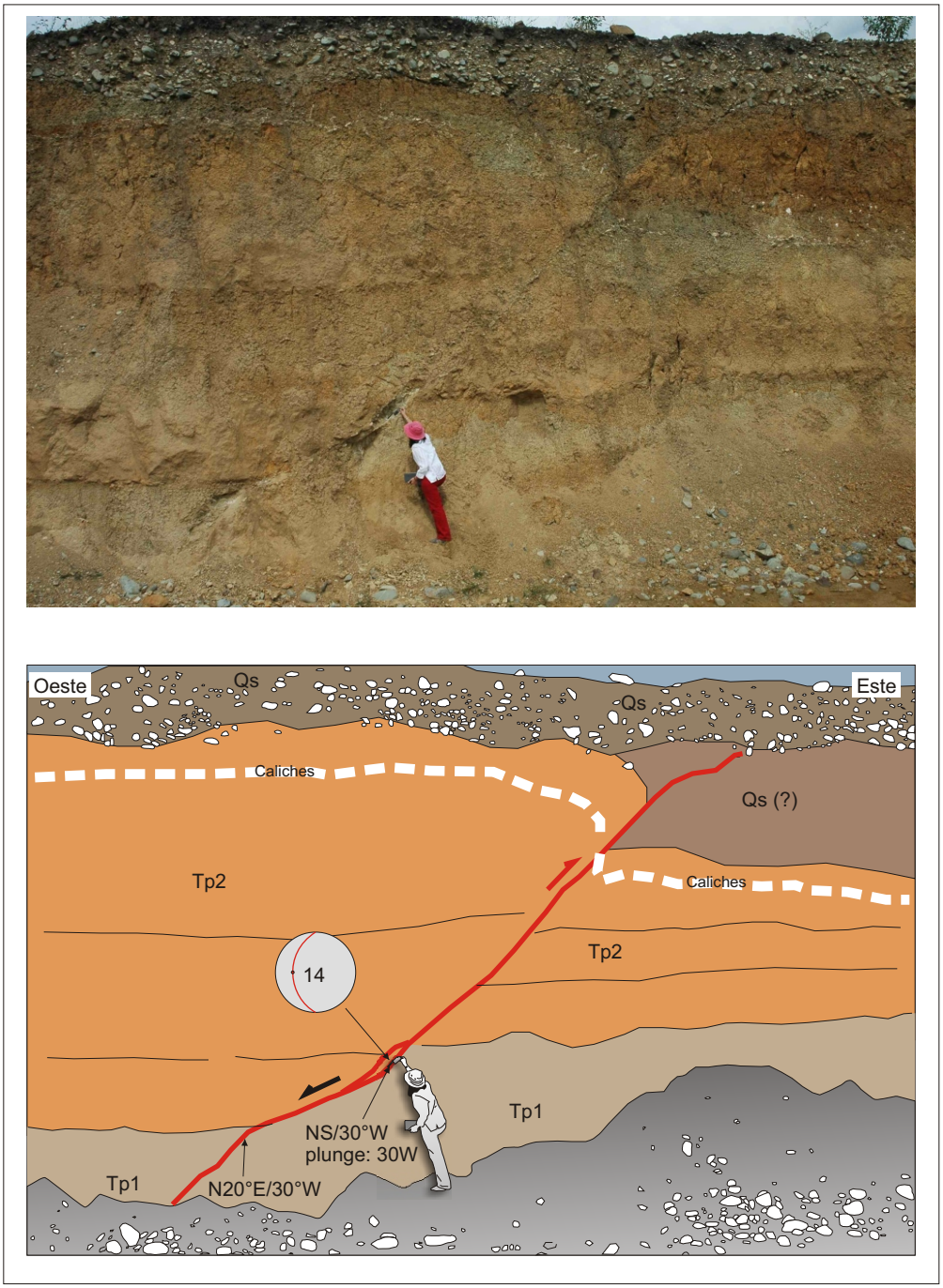


Figura 16. Arriba, fotografía de la falla normal reactivada como falla inversa. Abajo, dibujo interpretativo. En la parte inferior de la falla el desplazamiento de niveles de la Formación La Paila (Tp1 y Tp2) aparece como normal mientras que en la parte superior el desplazamiento de los niveles de caliche indican que el fallamiento más reciente es inverso. El nivel de gravas cuaternario (Qs) al parecer no está afectado, sin embargo los niveles Qs (?) si lo están.

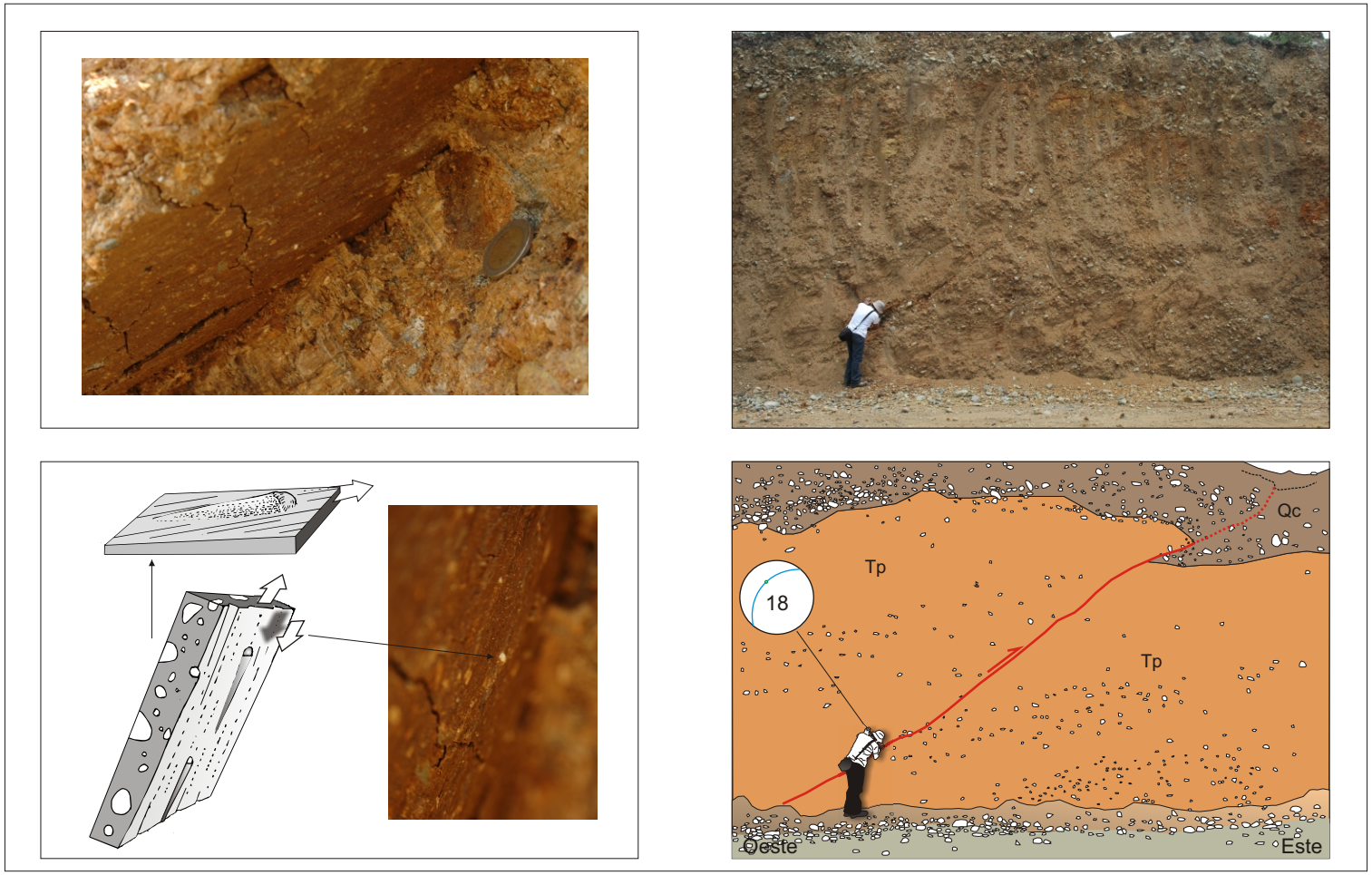


Figura 17. Arriba derecha, Retrocabalgamiento Sonso correspondiente al dato de falla 18. Abajo derecha, dibujo interpretativo de esta falla inversa con vergencia al este afectando rocas de la Formación La Paila (Tp) y depósitos cuaternarios (Qc). Izquierda fotografía del plano con estrías en el que sobresalen guijos de cuarzo con "sombras" de arcilla tal como se ilustra en el esquema de la izquierda inferior; las flechas indican el sentido del movimiento.

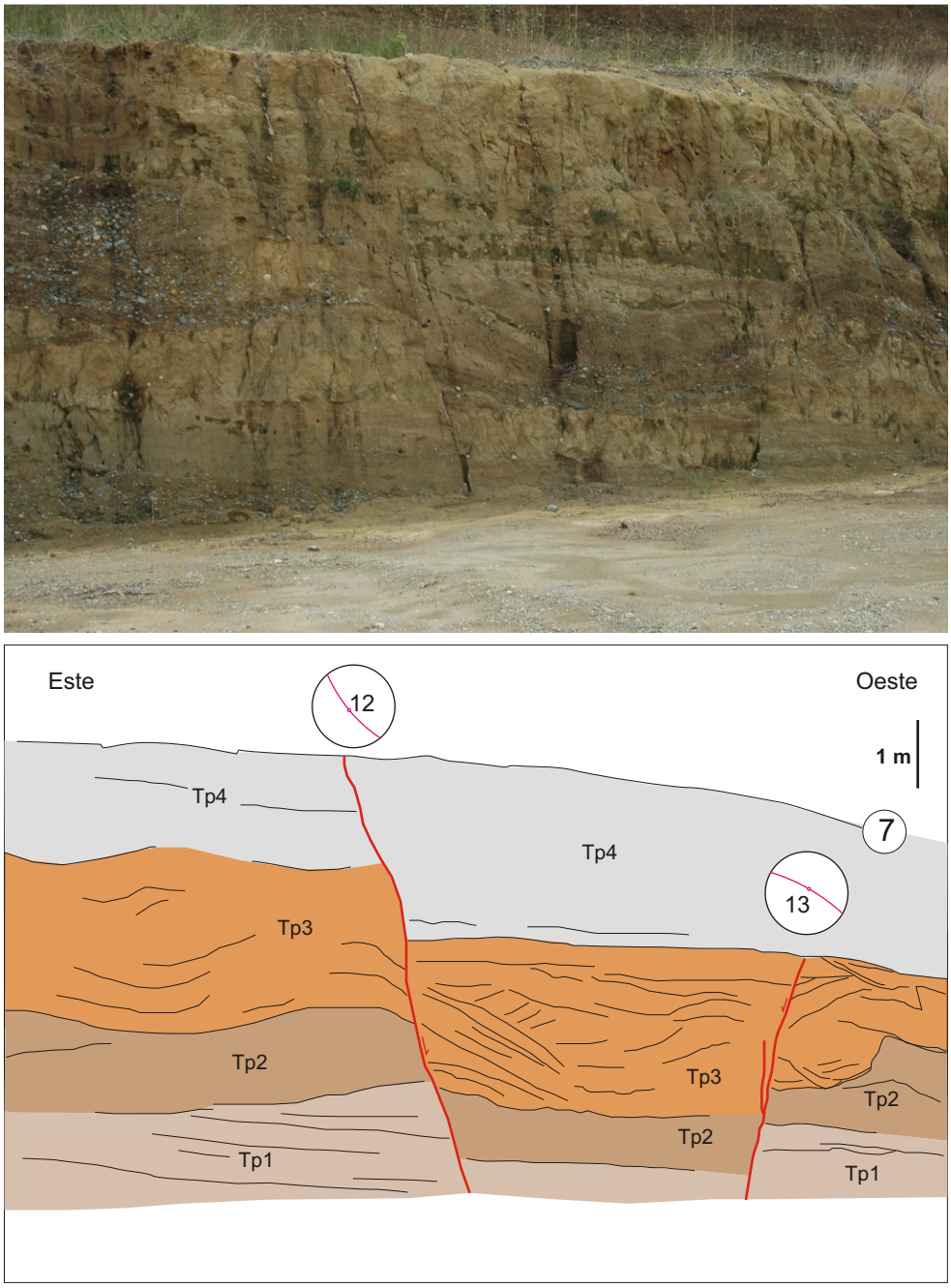


Figura 18. Pequeño graben formado entre las fallas normales 12 y 13. La falla 13 es fosilizada por una superficie de erosión más antigua. La falla 12 es más reciente que la superficie de erosión. Esto sugiere que el graben fue formado durante dos fases diferentes de actividad tectónica. Originalmente esta estructura comenzó como un semigraben. La superficie visible en la parte superior de la fotografía corresponde a un terraplén dejado por los trabajos de la cantera, que aprovecharon una capa de arcillolitas cuya base coincide con una superficie límite de orden 7 (numero encerrado en circulo).

inversas. Esto está acorde con la orientación del esfuerzo mínimo. La segunda hipótesis podría indicar que algunas fallas inversas están aprovechando antiguas fallas normales, tal como se vio en la falla del sitio 14 (Figura 16).

- Fallas de rumbo

Estas fallas usualmente son diagonales a las fallas inversas, aunque raramente están representadas en la cantera, la más evidente corresponde a la falla 7 (Figura 12). Esta falla y un pliegue monoclinal están fosilizados por una superficie de orden 7 en el extremo oriental de la cantera.

- Plegamiento anticlinal y monoclinal

Con una dirección principal NS los dos pliegues principales son: un pliegue mayor y mas reciente que corresponde a la estructura del anticlinal de Sonso (Figura 13). Un pliegue interno monoclinal que afecta estratos de la Formación La Paila y que origina una discordancia angular en el sector de máxima flexura (Figura 14). Es así que los niveles Tp4 a Tp8 están en discordancia angular contra un depósito limo-arenoso (Tp9). Aunque gran parte de Tp8 aparece paraconforme debajo de Tp9, de la misma forma que Tp4 debajo de Tp9. Evidentemente esta superficie de separación representa un hiato de duración desconocida. La mayor parte de las fallas encontradas en este sector son inversas con pequeños desplazamientos, sin embargo estas fallas tienen vergencia contraria a la del monoclinal. Se ignora el tipo de fallamiento que originó la estructura monoclinal (inverso o normal?).

- Discordancias y paraconformidades

En la Cantera El Vínculo también se observaron varias superficies de erosión. La mayor parte de ellas se relacionan con migración de canales, algunas corresponden a superficies límite de orden 6 (senso Miall, 1996). Sin embargo fueron detectadas superficies de orden mayor entre 7 y 8 lo que podría implicar lapsos de tiempo sin depositación y/o erosión entre 10^3 y 10^5 años. La superficie límite más antigua de este orden se observó en los estratos más bajos de la cantera (Figura 19). En este sitio se detectó una suave discordancia que separa depósitos arenosos limosos en la base y gravas fluviales hacia el techo. En orden cronológico la superficie siguiente, unos 20 metros más arriba estratigráficamente, corresponde a la superficie de erosión del monoclinal (Figura 14). Estas dos superficies que estan relacionadas con las discordancias locales, demuestran que la Formación La Paila se formó bajo un régimen tectónico activo, el cual también está sustentado por el tipo de depositación observada. Los depósitos finos, principalmente areniscas líticas lodosas y lodolitas están frecuentemente intercaladas con cuerpos canaliformes cuya granulometría es muy variable. Los conglomerados son clastosoportados con granulometría que va desde guijos hasta gravas que desarrollan estratificación inclinada sugiriendo formación de barras de diferente morfología. Estos depósitos reflejan cambios rápidos en la descarga de los canales fluviales y responden también a patrones de migración de los mismos. Los depósitos de arenas y lodolitas sugieren por el contrario fenómenos de acreción vertical y desborde de canales (fundamentalmente los niveles de arenas tabulares intercaladas en las lodolitas).

Estos procesos son parte de fenómenos de gran escala en los cuales se pueden deducir ambientes fluviátiles donde los canales del río migraban sobre una superficie de inundación relativamente plana. La depositación consecuente con la formación del monoclinal fue principalmente fina formada por arenas y limos. Esto indica probablemente una fase corta de quietud tectónica, lo que puede ser apoyado en el hecho de que muchas fallas pequeñas inversas reportadas en este trabajo son interrumpidas por esta superficie. El hiato representado aquí sugiere que un pequeño relieve generado luego de la actividad tectónica fue allanado por la erosión. Esta fase erosiva es interpretada como una fase de tranquilidad tectónica, ya que los depósitos que cubren esta superficie son generalmente de tipo fluvial fino. Esta superficie de orden 7 fue aprovechada por los trabajos de la cantera para construir una pequeña terraza (ver Figuras 14 y 18).

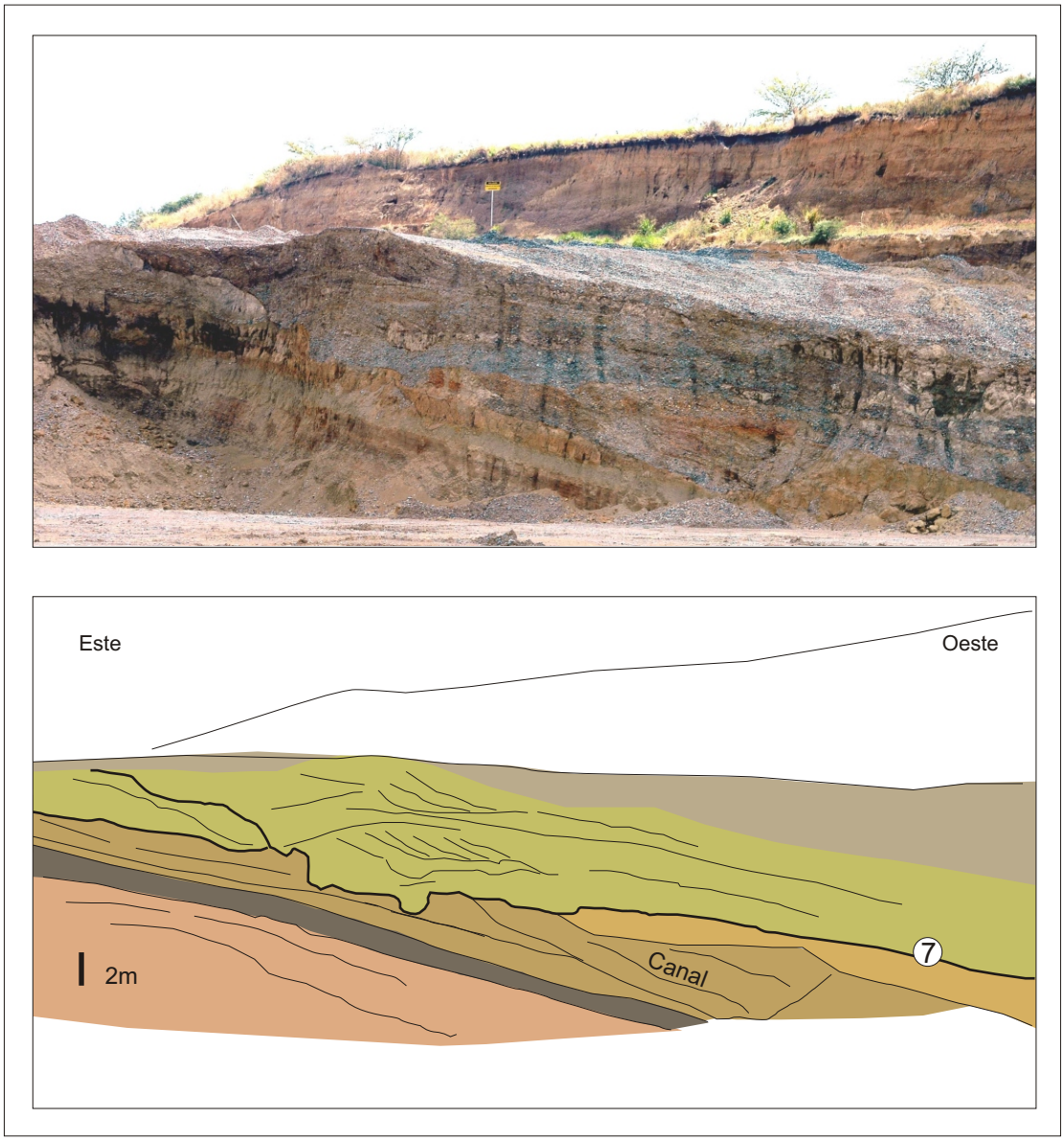


Figura 19. Detalle de la Figura 13, extremo occidental de la cantera El Vinculo. Aquí se observa una suave discordancia entre depósitos de gravas de canales fluviales y depósitos mas finos originados en llanuras de inundación. La superficie límite es de orden 7 o mayor.

Es muy posible que los fenómenos tectónicos activos del área hallan modificado periódicamente el tipo de régimen fluvial en el área, por esta razón no es raro encontrar superficies como las que se encuentran en Tuluá, donde depósitos de llanuras de inundación fueron inclinados suavemente y posteriormente erosionados por la migración o avulsión de canales fluviales.

Por último, la superficie límite más reciente, de orden 10 (entre 10^6 a 10^7 años), corresponde a la discordancia existente entre la parte superior de la Formación La Paila y los depósitos cuaternarios, tal como se ve en la Figura 20. En este sector, flanco oeste del Anticlinal de Sonso, los estratos de la Formación La Paila se inclinan hacia el occidente de la misma manera que los depósitos cuaternarios. Sin embargo la mayor inclinación de los estratos de la Formación La Paila produce una discordancia angular cercana a los 20º con las gravas del Cuaternario. Sobre el eje del anticlinal los depósitos de gravas cuaternarios se hallan en paraconformidad cercanamente horizontal con los depósitos de la Formación La Paila.

Las fallas ilustradas en el esquema (Figura 12) indican una compresión aproximada NW-SE, lo cual concuerda con la dirección del plegamiento en este sector de la Saliente de Sonso. Las fallas normales y de rumbo responderían al estilo general compresivo, aunque algunas de estas fallas pueden ser heredadas de un sistema distensivo (?) más antiguo. Junto con el fallamiento existen pliegues (monoclinal) que han sido erosionados y cubiertos por la depositación subsecuente. En la cantera, fue posible distinguir dos grandes superficies de orden mayor (7 a 8?). La superficie inferior produjo una discordancia suave entre los depósitos finos subyacentes y material fluvial grueso dominado por acreción lateral. En este caso la depositación sugiere un aumento en la capacidad de carga en los drenajes que podrían haberse producido por variaciones en el gradiente topográfico. Estas variaciones pueden haber sido coetáneas con fallamiento.

La superficie de erosión superior representa una superficie probablemente de quietud tal como lo sugieren los depósitos suprayacentes y una serie de fallas que son interrumpidas por ésta. Esto prueba que la depositación de la Formación La Paila no fue continua como se podría suponer. La sedimentación evidentemente estuvo controlada por la tectónica ya que algunas fallas reconocidas fueron decapitadas por erosión y cubiertas por la depositación posterior.

Los depósitos que conforman la estructura anticlinal en Sonso son principalmente aquellos de la Formación La Paila y gravas del Cuaternario. Sin embargo aún no se cuenta con datos geocronológicos precisos que permitan separar estas secuencias.

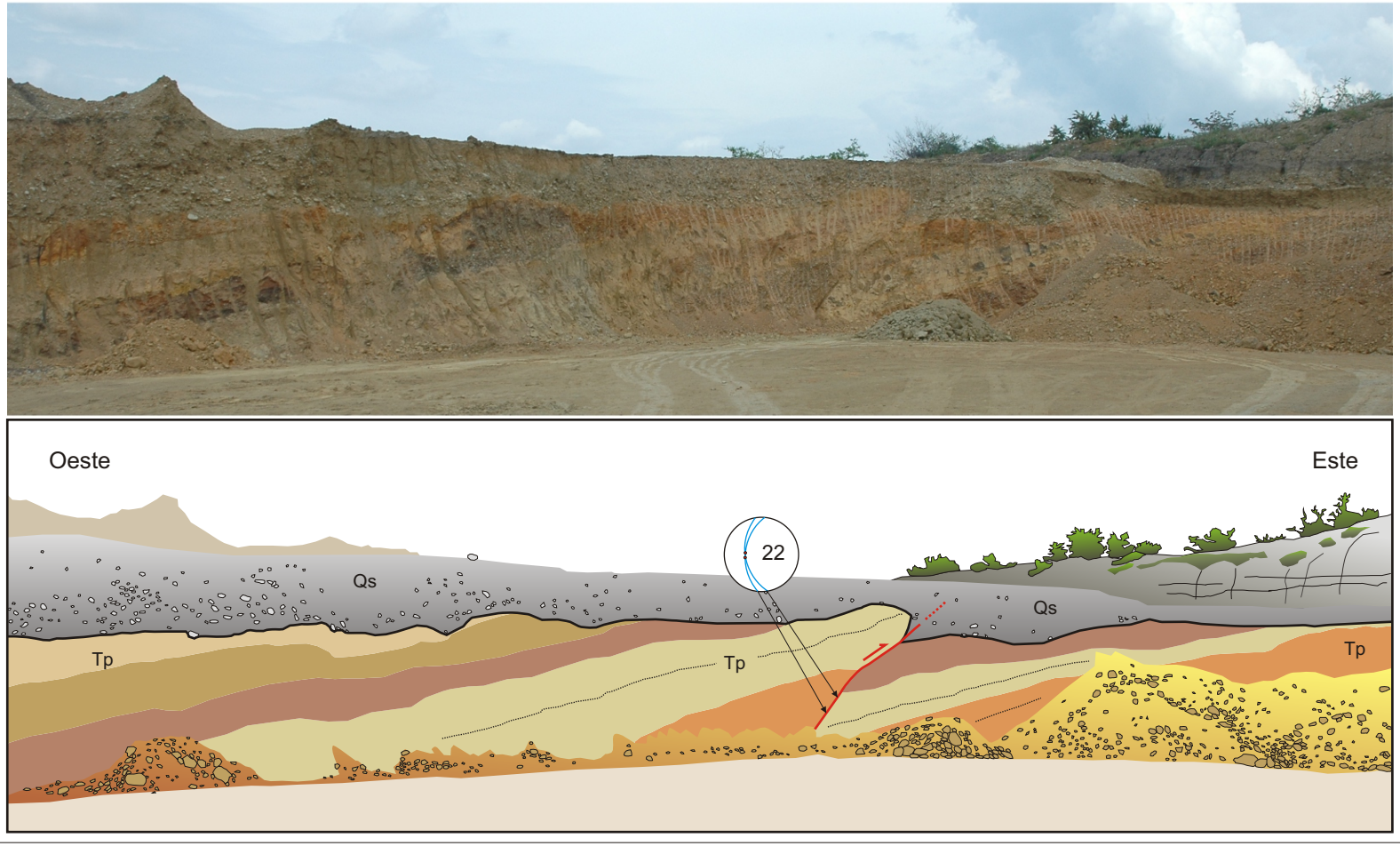


Figura 20. Arriba fotografía del retrocabalgamiento Sonso. Abajo esquema interpretativo de la estructura. Resalta la discordancia angular entre las capas de la Formación La Paila (Tp) inclinadas suavemente hacia el oeste y los depósitos cuaternarios suprayacentes (Qs). El estereograma corresponde al dato 22 en la Figura 12. Para la escala utilice las huellas de vehículos.

Sector Amaime

En este sector solamente se reinterpretaron las trincheras Venecia y Piedechinche realizadas por Woodward-Clyde (1983), debido a la continuidad que presenta este escarpe con los escarpes o abombamientos de dirección NW que se prolongan con expresión más conspicua hasta el sur de Sonso o en la "Saliente de Sonso". Este escarpe de Piedechinche tiene una expresión más sutil que aquellas reportadas en las evidencias geomorfológicas de este trabajo.

Reintrepretación de Trincheras Woodward-Clyde (1983)

Pionero en Colombia, el trabajo de Woodward-Clyde (1983), introdujo variables que son claves para estudios de amenaza sísmica. La identificación de aspectos geomorfológicos, estructurales, estratigráficos y geocronológicos en varios segmentos de las fallas "Romeral" y Cauca-Patía, aportó indicadores primarios de fallamiento cosísmico y postsísmico. En su trabajo denominaron el segmento de falla El Paraíso, a un tramo de 7 km de la "zona de falla Romeral", que se extiende desde el río Amaime en sentido NNE. Segmento caracterizado por una serie de escarpes discontinuos, subparalelos y relativamente cortos (1 a 2 km de longitud) que cruzan escarpes topográficos del Cuaternario aluvial y de abanicos conformados por flujos de escombros.

En aquel momento, 1983, estos autores determinaron con base en la geometría de los escarpes, sinuosa con lado este levantado y cóncavos hacia el este, y en comparaciones con rasgos similares dejados por terremotos históricos ocurridos en Australia, California y Algeria, que los escarpes sugerían la actividad de fallas inversas de bajo ángulo y buzamiento hacia el este.

- Trinchera Venecia (Woodward-Clyde, 1983)

Esta trinchera fue excavada a través de dos escarpes topográficos, el escarpe más oriental con 10 m de altura y el escarpe más occidental con 2 metros de altura. Allí se identificaron dos flujos de escombros del abanico aluvial separados por un paleosuelo con desplazamiento y la existencia de materiales coluviales depositados al pie del escarpe de la falla. Aunque estos autores no identificaron fallas en la trinchera Venecia, sugirieron que el plegamiento que presentan los flujos de escombros del abanico, fue generado por fallas inversas que se hallan cerca de la superficie del terreno.

Al paleosuelo que conforma la superficie del terreno le estimaron una edad de 2000 años AP y aunque el plano de falla no fue trazado en el esquema presentado por los autores, estos sugirieron su posición con base en el plegamiento de los flujos, del paleosuelo y del suelo actual (Figura 21). Los autores estiman que el desplazamiento mas reciente de la falla es solamente de 1m, teniendo en cuenta la separación vertical del suelo actual, y no la altura vertical del escarpe inferior, la cual alcanza 2.0 m. También deducen que existió un desplazamiento anterior a la formación del suelo actual, teniendo en cuenta el paleosuelo plegado de edad ^{14}C 6320 a BP, para el cual infieren una separación vertical aparente de 1.75 m. Con base en esto los autores infieren una velocidad de deslizamiento de 0.2mm/año a 1mm/año.

- Trinchera Piedechinche (Woodward-Clyde, 1983)

En esta trinchera midieron un plano N44W/12NE con trend de estría N38E. A lo largo de esta falla encontraron una arcilla de falla ("clay gouge") dentro de la cual midieron las estrías. El espesor de la arcilla varía a lo largo del buzamiento. Adicionalmente, existe una capa limo-arcillosa inclinada aproximadamente 20º (Figura 22). Con base en estos datos atribuyen una ligera componente dextral al desplazamiento más reciente de la falla.

En esta trinchera identificaron dos flujos de escombros del abanico desplazados por la falla; el escarpe topográfico neto de 10 m de altura, está desarrollado en estos depósitos. Con base en las relaciones geomorfológicas y estratigráficas de los depósitos del abanico, como por ejemplo, el grado de meteorización de los depósitos del abanico y características erosivas de la superficie del abanico, estimaron una edad del abanico de aproximadamente 30.000 años. Este escarpe de 8.5 m posiblemente representa mínimo dos eventos de fallamiento durante los últimos 30000 años. Estos autores proponen un desplazamiento de 3 m, con una edad menor de 30.000 años y antes de la depositación del abanico más joven Qaf2 , y que por lo menos uno y posiblemente mas eventos son post abanico Qaf2.

- Nuevos hallazgos e interpretación

En el mes de Agosto de 2003, mientras se realizaba la acometida de un canal para la conducción de aguas del Ingenio Manuelita, se revisó la estratigrafía de los depósitos, flujos de detritos, que conforman este abanico aluvial. Las excavaciones se realizaron siguiendo un rumbo aproximado NS y un poco mas al oeste de los sitios de trinchera de Woodward-Clyde. En varios sectores se identificaron paleosuelos intercalados con flujos de detritos o de escombros, uno de ellos predataría el flujo de escombros más antiguo reportado por estos autores en la Trinchera Piedechinche, el paleosuelo de edad ^{14}C 7440 ±100 a BP predata estos abanicos con una edad mucho más reciente de lo que se ha pensado. Por otro lado, el grado de meteorización de los depósitos del abanico no se ha alcanzado in-situ, pues los materiales que conforman los flujos de detritos, clastos de diabasa meteorizados, en el momento en que se desprendieron de las laderas ya estaban meteorizados y conformaban diferentes horizontes de los basaltos o unidades de la Formación Amaime.

Esta observación tiene implicaciones importantes en la definición de los episodios de fallamiento que han ocurrido en este sector, una vez que Woodward-Clyde (1983) plantea que el escarpe de Piedechinche, probablemente se desarrolló por dos o más eventos de fallamiento inverso durante los últimos 30.000 años. Si la edad de los depósitos es menor, los escarpes pudieron desarrollarse por rupturas de mayor magnitud o las velocidades de deslizamiento son mucho mayores.

Esto se sustenta además con base en la reinterpretación de la trinchera Venecia Woodward-Clyde (1983). Los desplazamientos verticales inferidos en las paredes de las trinchera, muestran que el último evento reportado de 2000 años, edad inferida con base en la formación del suelo actual, corresponde a un salto de 1 m (Figuras 21 y 22). La deformación más reciente ocurrió por debajo del escarpe inferior cerca al occidente de la trinchera, donde un suelo de 2000 años se plegó y tiene una separación vertical de 1 m. El escarpe inferior de 2 m de altura y la separación vertical del suelo moderno de sólo 1 m, indican que debe haber un desplazamiento anterior al desarrollo del suelo moderno. Esto se sustenta por el hecho de que el paleosuelo plegado en la terminación oeste de la trinchera tenga una separación vertical aparente de por lo menos 1.75 m. Esto indica que el escarpe inferior se produjo por lo menos durante dos eventos de fallamiento. Uno post-paleosuelo pero anterior al suelo moderno, y uno posterior al suelo moderno. Con base en esta información deducen que la velocidad de deslizamiento de la falla varía entre 0.2 y 1.0 mm por año.

Dado que el plano de falla no se destapó en esa trinchera, y asumiendo el buzamiento típico de una falla de cabalgamiento (30º), el deslizamiento cosísmico es dos veces más que el salto medido. Dos metros de deslizamiento cosísmico en fallas de cabalgamiento bien puede producir terremotos con magnitudes del orden de 7.3-7.4 (p.e. (Slemmons, 1977; Hanks y Kanamori, 1979). En cambio, el evento más antiguo de 6000 años puede ser un poco más pequeño debido a que el salto medido fue de 0.75 m, si sólo se considera la evidencia de esta trinchera. Es decir el desplazamiento mínimo del evento más antiguo es por lo menos de 0.75 m pues se desconoce la posición del paleosuelo en el pie del escarpe de la falla.

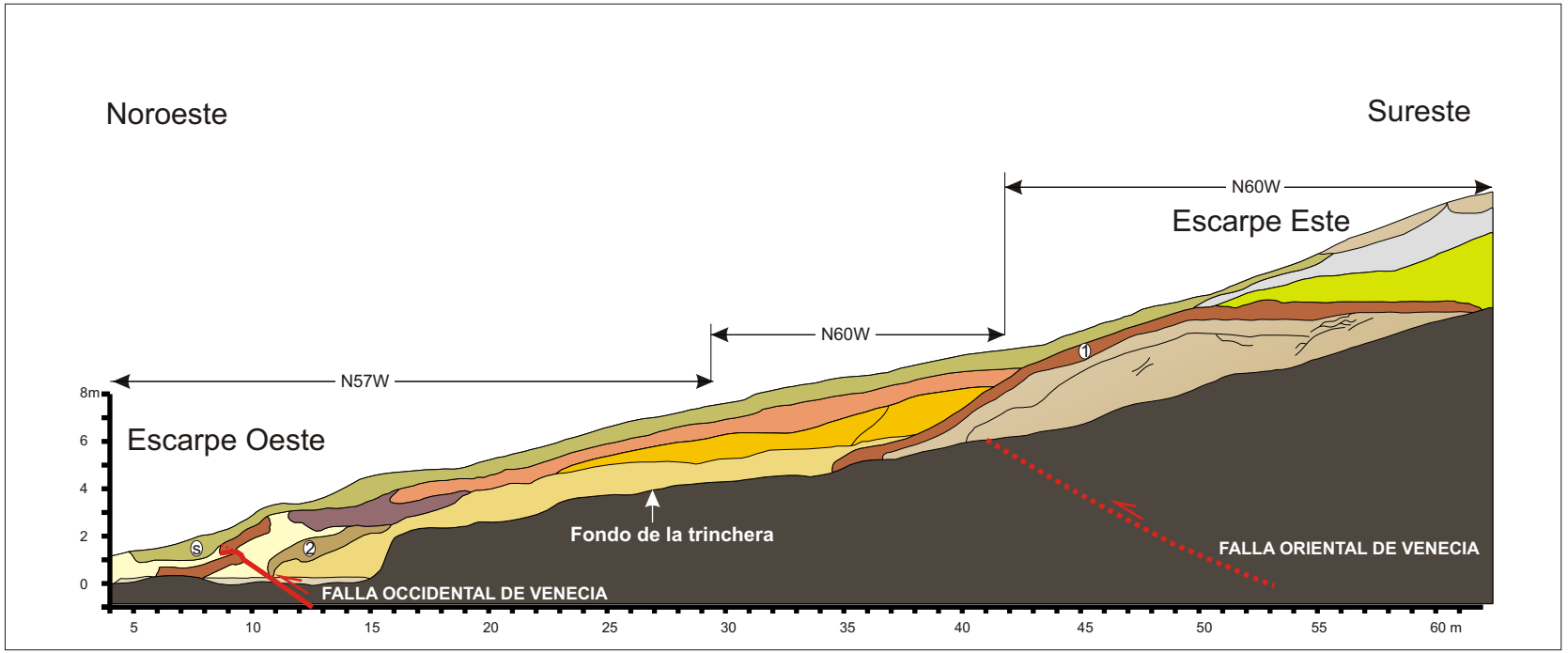


Figura 21. Trinchera Venecia. El registro fue tomado, modificado y reinterpretado de Woodard Clyde (1983). Estos autores identificaron el paleosuelo (2) y el suelo actual (s) plegados, con una edad 14C 6.320 años y 2000 años respectivamente. El suelo actual tendría una separación vertical de 1 m con relación a la base del escarpe mas bajo. El plegamiento fué generado por dos fallas inversas de vergencia oeste. El desplazamiento medido sobre el buzamiento de la falla, sería de 2 m.

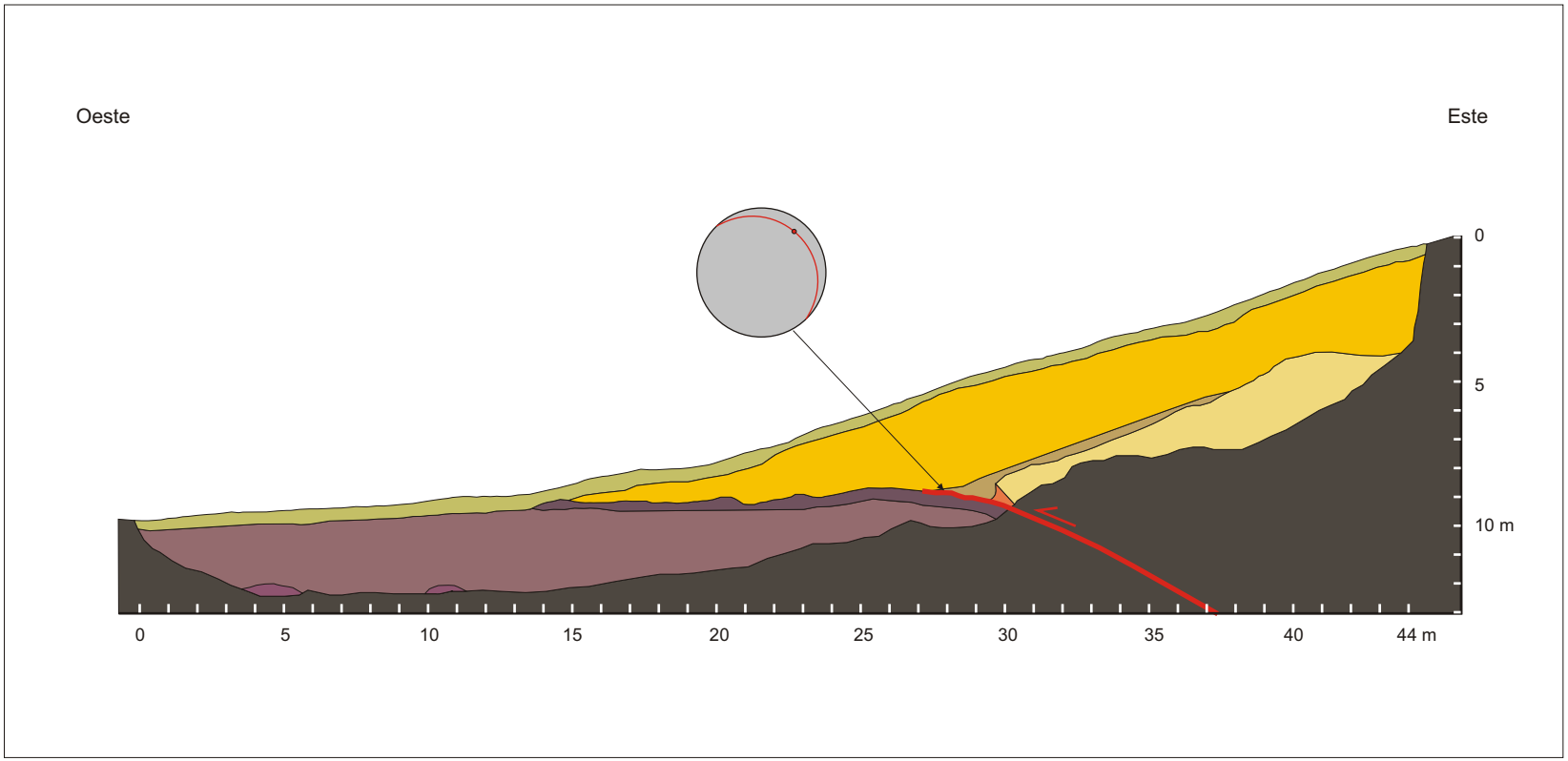


Figura 22. Trinchera Piedechinche. Modificada de Woodward Clyde Consultants (1983). Falla de orientación general NW inversa de vergencia oeste.

PIEDEMONTE ORIENTAL DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL

Sector Norte del Valle

- Reinterpretación afloramiento Cartago-Ansermanuevo (Pardo-Trujillo et al., 1994)

El trabajo realizado por Pardo-Trujillo et al. (1994) sustenta con base en análisis cinemático e interpretación de las relaciones estratigráficas, la existencia de actividad neotectónica en el norte del Valle del Cauca afectando depósitos de gravas supuestamente incluidos en la Formación Zarzal. Sin embargo estos autores no muestran datos que sustenten la edad reciente de estos depósitos, aunque se sugiere que ellos tienen una relación genética con las tobas de la Formación Zarzal. El afloramiento, reportado originalmente por el Profesor Etayo-Serna, está ubicado a lo largo de la carretera Cartago-Ansermanuevo en cercanías al puente sobre el río Cauca. Pardo-Trujillo et al. (1994) describieron esta sección, de cerca de 50 m, donde afloran sedimentos de gravas inconsolidados de origen fluvial afectados por fallamiento que es de tipo normal. En su momento estos autores hicieron el primer reporte que se conozca sobre estructuras de licuación en la región del Valle del Cauca y propusieron esta unidad como apta para buscar "sismitas". Adicionalmente interpretaron las estructuras de fallamiento normal con relación a un fallamiento mayor de tipo dextrolateral, probablemente a las fallas Toro y Quebradanueva. Esta idea ha sido mantenida como una hipótesis no sustentada con nuevos datos.

Una observación detallada del sitio permite ver que los depósitos afectados por estas fallas corresponden a gravas y arenas depositadas sobre la Formación Zarzal, constituida en este sector fundamentalmente por tobas y lodolitas. La Formación Zarzal refleja una fase volcánica importante cuya edad ha sido ubicada tradicionalmente en el Mioceno Superior (Van Houten y Travis, 1968; Murcia, 1982). Sin embargo esta formación se ha encontrado interdigitada con los depósitos volcanoclásticos del Abanico del Quindío (Cardona y Ortíz, 1994) lo que sugiere que los depósitos de origen fluvial depositados sobre la Formación Zarzal podrían ser mucho más recientes.

La estructura principal observada en el afloramiento de Cartago-Ansermanuevo (Figura 23) es un graben relativamente amplio, con un pequeño horst que se puede identificar en ambos flancos de la carretera. La dirección principal del fallamiento en este sitio es aproximadamente NE.

De la interpretación estructural realizada por Pardo-Trujillo et al. (1994) se deduce que el esfuerzo principal (σ_1) está cercano a la vertical como es usual en este tipo de fallamiento. La interpretación más evidente es que este sitio estuvo sometido a un régimen distensivo. Sin embargo, muy cerca de este sitio en el cruce de la nueva carretera que conduce de Ansermanuevo a Bolivar se observaron una serie de fallas normales (Figura 24) que se interpretan como producto de fenómenos de licuación o fallas gradadas senso Seilacher (1969, 1990). En este sector las fallas observadas generalmente se propagan dentro de los niveles más competentes y desaparecen en los niveles arcillosos inferiores que son mas susceptibles a licuación (ver Lc en Figura 24). Bajo estos niveles las estructuras sedimentarias se conservan sin perturbación tectónica (ver Ac en Figura 24). Junto con esto se observa frecuentemente inyección de arcillas y modificaciones bruscas de espesores en los niveles blandos, fenómeno usualmente cosísmico generado por la pérdida de cohesión de estos niveles durante la licuación.

Recientemente un estudio extensivo de estos depósitos ha documentado estas estructuras (Neuwerth et al., 2006).

Todo esto sugiere que la licuación, puede ser el fenómeno que esté induciendo la generación de muchas de las estructuras distensivas observadas en este sector del valle del río Cauca. Sin embargo a la luz de la información existente es imposible decidir si algunas de las fallas documentadas en esta sección se originan en el basamento o simplemente son manifestaciones superficiales de licuación. Por otro lado las fallas vistas en la Cordillera Occidental en los sectores Dagua-Calima (Woodward-Clyde, 1983) y documentadas en esta tesis en el sector de San Marcos sugieren que existen fallas NNE con componente normal relacionadas con un fallamiento transcurrente probablemente dextral. De esta manera no se descarta que parte de las estructuras encontradas en el norte del Valle (Sector Cartago-Ansermanuevo) estén relacionadas a tensión producidas por fallas de rumbo.

Por otro lado, las gravas que afloran a lo largo de la carretera Panorama, cerca de Ansermanuevo, suprayacen las tobas y diatomitas de la Formación Zarzal (sensu stricto) formando pequeñas colinas. Estas gravas usualmente tienen estructura lenticular con grandes variaciones laterales. La presencia de gravas con estratificación inclinada e imbricación sugiere transporte fluvial. Además son frecuentes los intraclastos cerca de bases erosivas. Todo esto contrasta con las características faciales de la Formación Zarzal subyacente compuesta fundamentalmente por materiales finos de origen lacustre. Se sugiere que las colinas en las cuales afloran los niveles de gravas son el resultado de erosión diferencial, pues las gravas actúan como cubiertas más resistentes. Es decir que como en el caso del afloramiento de la Figura 25, la estructura original fue un pequeño graben relleno de depósitos de gravas fluviales que por erosión diferencial se convirtió en un relieve invertido.

Tabla 4. Datos estructurales Sector Norte del Valle (Pardo-Trujillo et al., 1994)

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
1	242/32SE	Pich: 90	Normal
2	65/ 65 SE		
3	82/ 77 NW		
4	68/ 90		
5	64/ 60 NW		
6	53/ 55 NW		
7	51/ 53 NW		
8	32/ 16 SE	Plunge: 10 E	Destral normal
9	91/ 44 SE	Pich: 75 SE	Normal dextral
10	58/ 60 NW	Pitch: 80 W	Normal
11	73/ 49 SE		
12	42/ 48 NW		
13	55/ 70 NW		
14	32/ 45 SE		
15	40/ 45 SE		
16	154/70 NW		
17	63/ 70 NW		
18	37/ 78 NW		

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
19	212/66 SE		
20	204/ 60 SE		
21	235/ 52 NW		
22	253/ 55 SE		
23	94/ 32 NW		
24	47/ 53 SE		
25	218/ 57 NW		
26	53/ 77 NW		
27	54/ 64 SE	Pitch: 90	Normal
28	53/ 42 SE	Pitch: 80 N	Normal
29	221/ 40 SE		
30	222/ 42 NW		
31	240/ 66 NW		
32	269/ 48 SE		
33	55/ 72 NW		

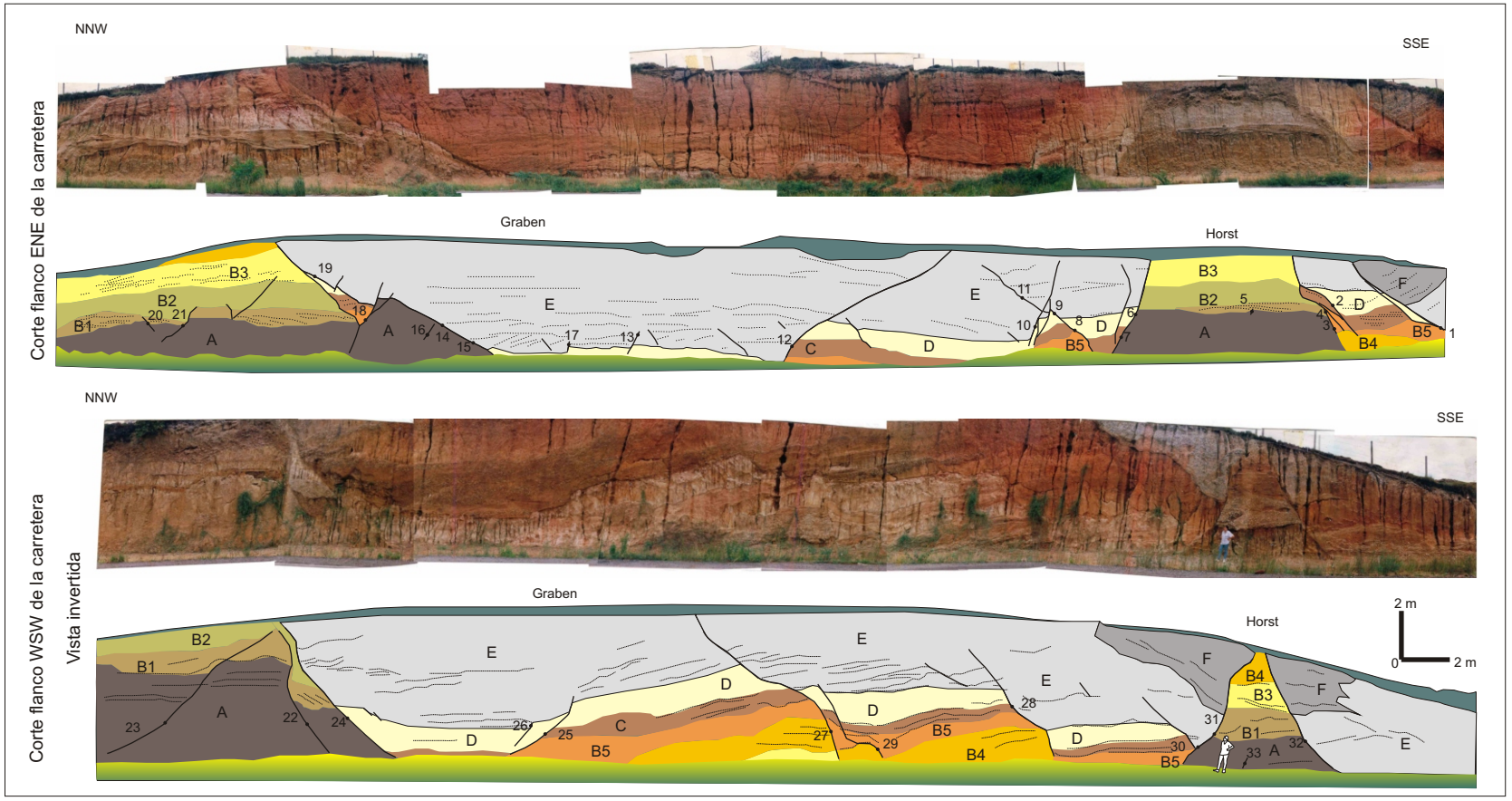


Figura 23. Mosaicos fotográficos y esquemas interpretativos del corte de la carretera Cartago-Ansermanuevo en cercanías del puente sobre el río Cauca. El mosaico inferior fue invertido digitalmente para compararlo con el mosaico superior, tomado en el flanco opuesto de la carretera, visto en su posición normal. Las estructuras mas notorias son un graben amplio y un horst angosto que se pueden seguir en los dos flancos. los números señalan sitios de medición estructural, las letras representan niveles de la secuencia estratigráfica (A: mas antiguo, F: mas reciente). Las fotografías fueron proporcionadas por Mario Moreno-Sanchez y la interpretación se basa en Pardo-Trujillo et al. (1994). Redibujado para este trabajo.

Figura 24. Ejemplo de deformación plástica en afloramientos de la carretera Panorama entre Asermanuevo y la Unión. Las arenitas conglomeráticas (Ac) son el sustrato rígido sobre el que depósitos más finos sufrieron licuación (Lc) y a su vez los que se hallan sobre estos se fallaron.

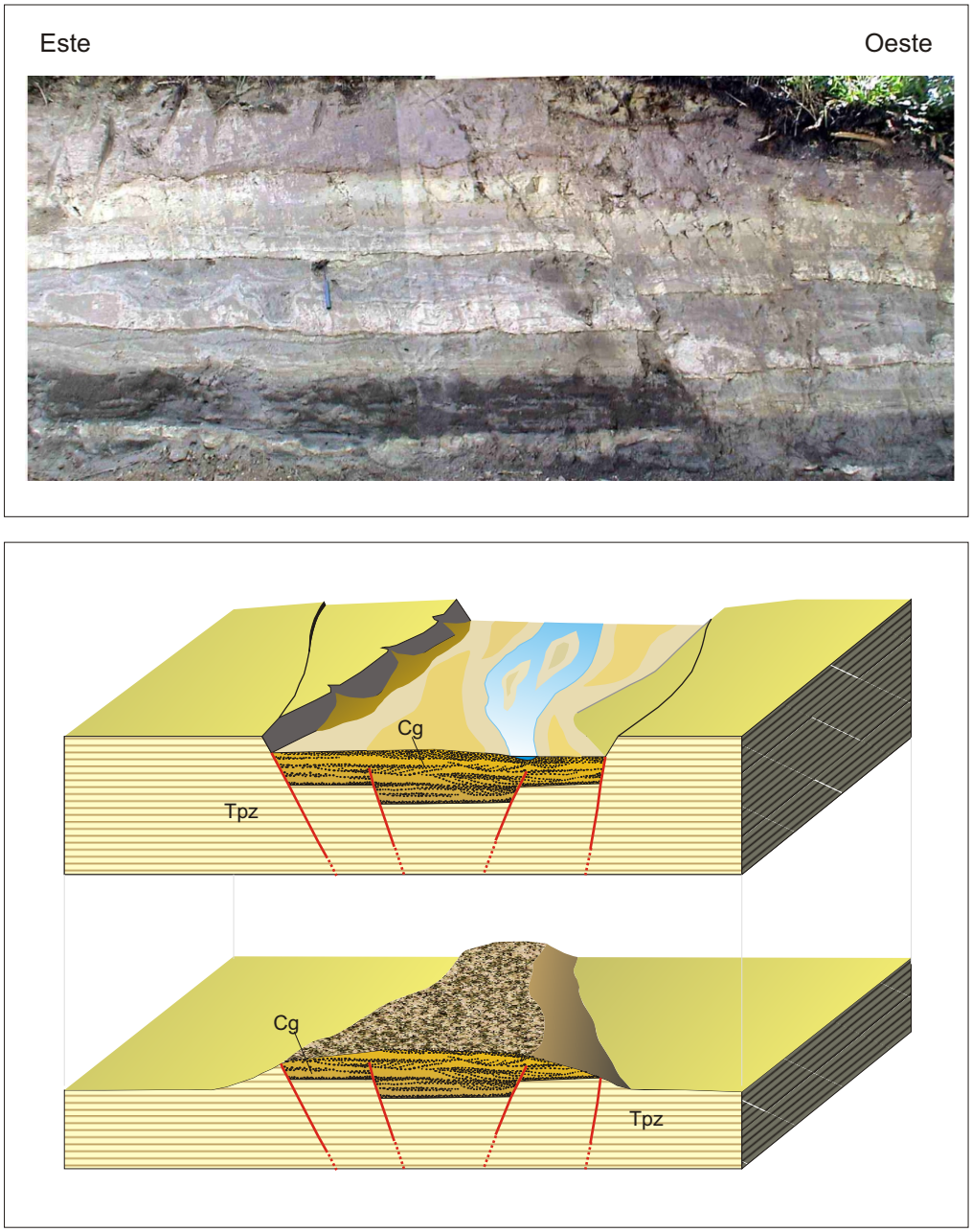


Figura 25. Arriba, fotografía de un afloramiento característico de la Formación Zarzal sobre la carretera Cartago-Ansermanuevo, una falla normal afecta estos depósitos. Abajo, esquema interpretativo de la inversión de relieve de las gravas (Cg) que suprayacen la Formación Zarzal (Tpz).

Sector Loboguerrero

- Reinterpretación Trinchera Loboguerrero (Woodward-Clyde, 1983)

En esta trinchera lo más notable es que se demuestra que la "Falla de Loboguerrero" es una estructura de deslizamiento lateral. Aunque a esta falla Woodward-Clyde Consultants (1983) le atribuyó una componente izquierda, la determinación se basó únicamente en el desplazamiento aparente de una colina. En el esquema de la trinchera realizado por estos autores (Figura 26) reportan que la falla principal (planos 3 y 4 en Figura 26) tiene espejos de falla con estrías horizontales. Junto con la falla principal existen una serie de fallas normales menores conformando un arreglo en flor negativa. Estas fallas cortan a través de por lo menos cinco niveles de paleosuelos, sin embargo ninguna de estas fallas toca la superficie del terreno.

La Falla de Loboguerrero es una estructura regional que se asocia a la falla que pasa por el Embalse Calima, la Falla Dagua-Calima (Figura 3), una estructura que corre paralela a la Cordillera Occidental con una dirección general que varía entre 10º a la latitud del embalse en Darién y unos 30º a la latitud de Rio Frío.

Esta estructura con carácter transcurrente podría relacionarse con otras fallas paralelas a la Cordillera Occidental.

Tabla 7. Datos estructurales Trinchera Loboguerrero [Woodward-Clyde (1983)]

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
1	N56E/82S	plunge:60NE	[a] Vertical con componente horizontal
2	N5W/45S		[a] Vertical
3	N45E/60S		[b] Horizontal
4	N56E/82S		[b] Horizontal
5	N45E/80N	plunge:67S	Desconocido
6	N70E/84N		Desconocido
7	N50W/55N	N30W/40W	Vertical
8	N75W/85S	Plunge:35W	[b] Horizontal con componente vertical
9	N50E/75S		Desconocido
10	N35E/78E		Desconocido
11	N30W/40W		[b] Horizontal

[a]Para el tratamiento de los datos se asumió una componente inversa con base en el combamiento del paleosuelo 2; [b]Para el tratamiento de los datos se asume una componente principal dextral.

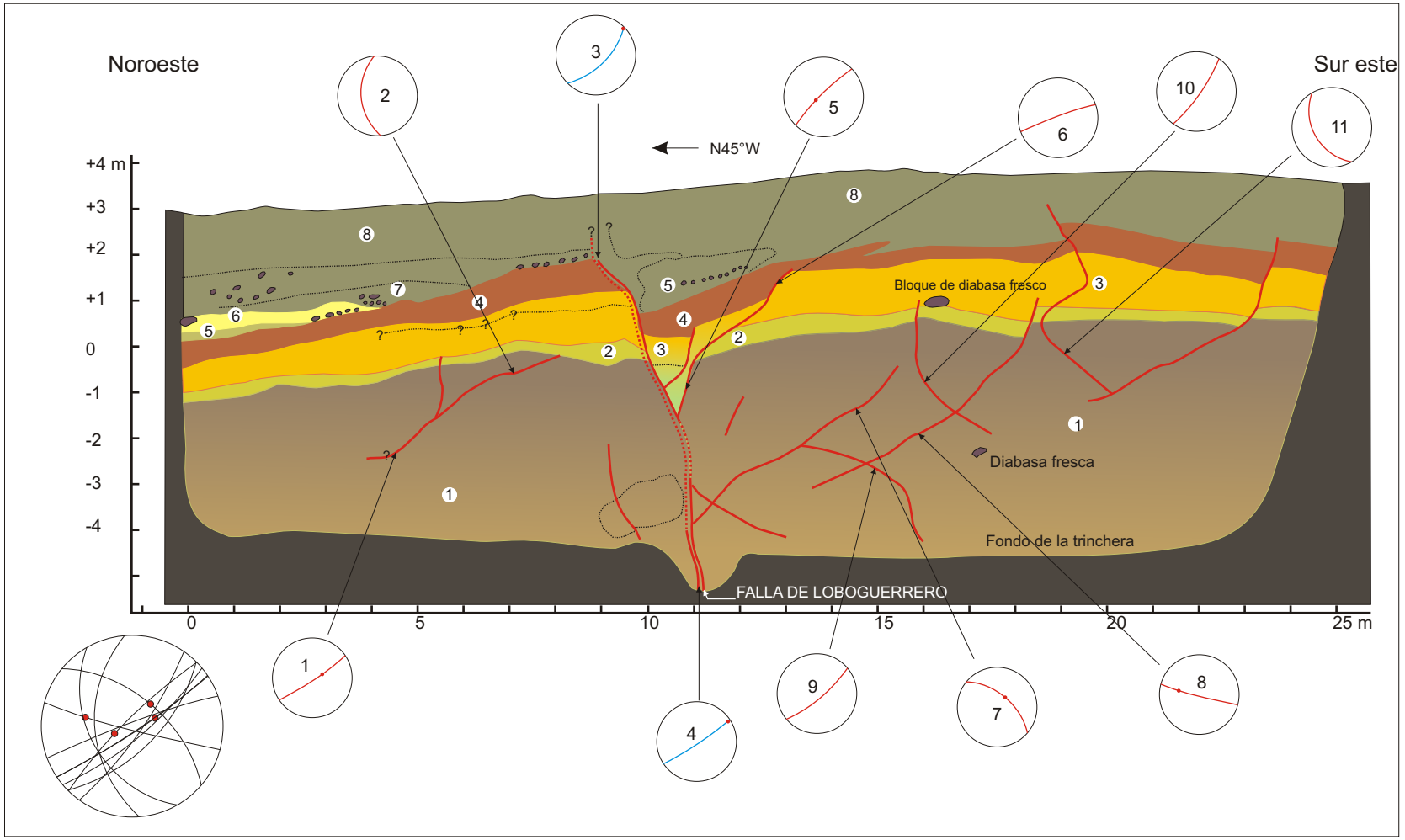


Figura 26. Trinchera Loboguerrero. Redibujada de Woodward-Clyde (1983). Flor negativa donde la falla principal, en el centro de la trinchera es de rumbo. Los numeros dentro de las proyecciones equiangulares corresponden a los consecutivos de las fallas

Sector Variante San Marcos

Sobre la carretera Yumbo-Mediacanoa, durante los trabajos de construcción (Agosto de 2005) de la Variante San Marcos se expuso la falla principal del piedemonte oriental de la Cordillera Occidental, en una secuencia de basaltos de la Formación Volcánica (Kv), en los cuales se tomaron datos de la disposición estructural de las principales fallas observadas (Figura 27). Estos datos se llevaron al programa TectonicsFP. Un análisis preliminar muestra que el fallamiento principal es de rumbo con fallamiento gravitacional subordinado. La presencia de cuñas coluviales podría indicar el momento del hundimiento asociado con estas estructuras. Lo anterior indica que la estructura en este sector puede ser una flor negativa ya que el trazo de la falla principal visto en planta, en imágenes generadas con datos del STRM, es rectilíneo y escalonado con otras fallas paralelas (Figura 27). Esto está en contradicción con lo que algunos autores han concluido sobre el estilo tectónico del borde oriental de la Cordillera Occidental.

Tabla 6. Datos estructurales Variante San marcos

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
1	N35E/65W	Plunge: 65W	* Vertical
2	N40E/55S	Trend: N30W	Horizontal con componente vertical
3	N40E/52SE	Trend: N20W	Horizontal con componente vertical
4	N85W/22N	Plunge: 22N	* Vertical
5	N85E/90	Plunge: 35SE	Horizontal con componente horizontal
6	N60E/69SE	Plunge: 25W	Vertical con componente horizontal
7	N20E/77W	Plunge: 0	Horizontal
8	N40W/75N	Plunge:0	Horizontal
9	N17W/67E	Trend: N26W	Vertical con componente horizontal
10	N27E/60W	Plunge: 60W	* Vertical
11	N66E/58N	Plunge: 0	Horizontal
12	N60E/45N	Plunge: 0	Horizontal

* Para el tratamiento de los datos y acorde con la expresión geomorfológica, se asume que los desplazamientos verticales son normales, por tanto las componentes horizontales serían dextrales

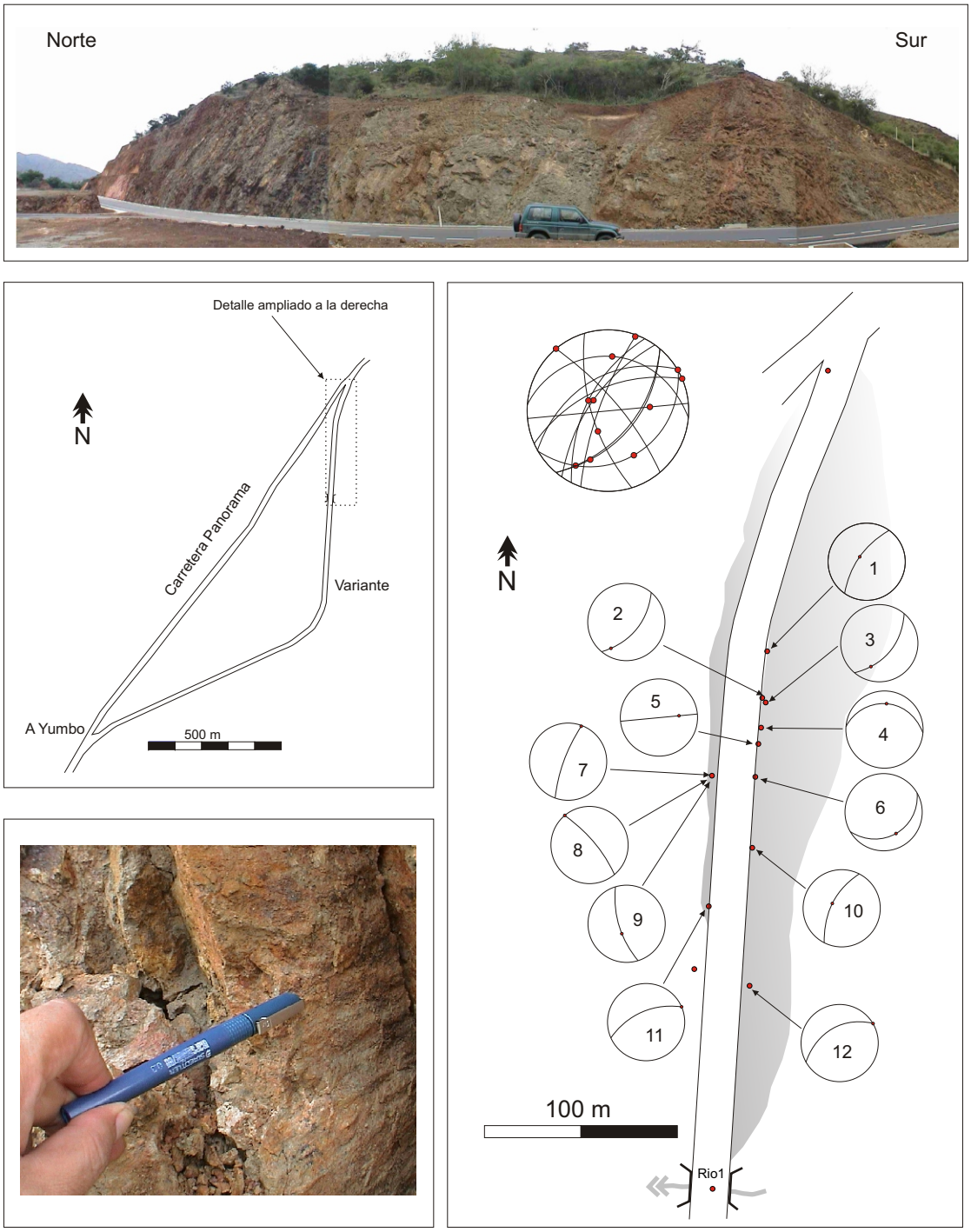


Figura 27. Arriba, mosaico fotográfico de los basaltos expuestos en el flanco este de la Variante San Marcos, en la carretera que conduce de Yumbo a Media Canoa, en el piedemonte oriental de la Cordillera Occidental. Arriba del vehículo existe una cuña coluvial que se relaciona al fallamiento. Abajo izquierda, detalle de estrías de rumbo sobre una de las fallas. Abajo derecha, esquema de la Variante con las proyecciones estereográficas de las fallas existentes a lo largo del corte.

Sector Saliente de Sonso

- Abanico fósil de Cali

En la divisoria de aguas entre los ríos Aguacatal y Cali han sido cartografiados depósitos indiferenciados del Cuaternario (Qd) (McCourt y Verdugo, 1985) (Qd en Figura 3). Estos depósitos fueron interpretados por primera vez por Stutzer (1934) como depósitos de origen volcánico correlacionables con la Formación Popayán (senso Hubach y Alvarado, 1934), asignándole un origen piroclástico a partir de los volcanes Puracé y Sotará. Posteriormente en el estudio hidrogeológico del valle del río Cauca Alvarez and Tenjo (1971) correlacionaron estos depósitos con la Formación Popayán descrita como una unidad de origen fluviovolcánico. Finalmente Padilla (1991) propuso denominar estos depósitos, que suprayacen en discordancia las Formaciones Volcánica (Kv) y Guachinte (Tp), como "Cono de Terrón Colorado" de acuerdo con la zona donde se levantó la columna tipo.

Con base en las características morfológicas y estratigráficas que presentan estos depósitos y utilizando los conceptos para la definición de abanicos (senso Stanistreet y McCarthy, 1993; senso Blair y McPherson, 1994) se diferenciaron dos unidades morfológicas representadas en un abanico antiguo y uno más reciente. Los depósitos del abanico antiguo denominado de aquí en adelante el "abanico fósil de Cali" (López y Vokler, 2000) con tono naranja en la Figura 28, se encuentran sobre la cota 1120 en un relieve invertido generado en la divisoria de aguas entre el río Cali y Aguacatal y sobre la cota 1050 en ambas márgenes del río Cali. Estos depósitos tienen un límite abrupto en su parte más occidental, coincidente con una de las mayores deflexiones del río Pichindé (mas adelante río Cali), sitio donde el relieve se empina abruptamente.

En una columna estratigráfica generalizada del abanico fósil levantada en la margen derecha del río Cali se identificó que el abanico está compuesto principalmente por flujos de escombros Gmm y Gcm (senso Miall, 1996) con intercalaciones de arenitas con alto contenido de material volcánico (López et al., 2005). Las cenizas fueron tratadas en el laboratorio de la Universidad Eafit y datadas mediante huellas de fisión por Gloria H. Toro. En ellas se evidenció la presencia de circones con edades que van desde 3.65±0.26 Ma hasta 1.03±0.12 Ma, razón por la cual Gloria H. Toro determina como edad máxima para el emplazamiento de estos depósitos el Cuaternario.

En la Figura 28 se localizan las cenizas volcánicas intercaladas con flujos de escombros, en la divisoria de aguas entre el río Cali y Aguacatal, sector Tory Castro. En este sitio se midieron fallas afectando los flujos de detritos y fallas formadas en el eje de un pliegue suave afectando las cenizas volcánicas (Sitio 1 en Figura 28, dato de falla 1 a 3 en Tabla 5). Un poco al sur de este sitio existe una falla NW con componente de rumbo afectando flujos de detritos (sitio 2 y dato de falla 4 en Figura 28).

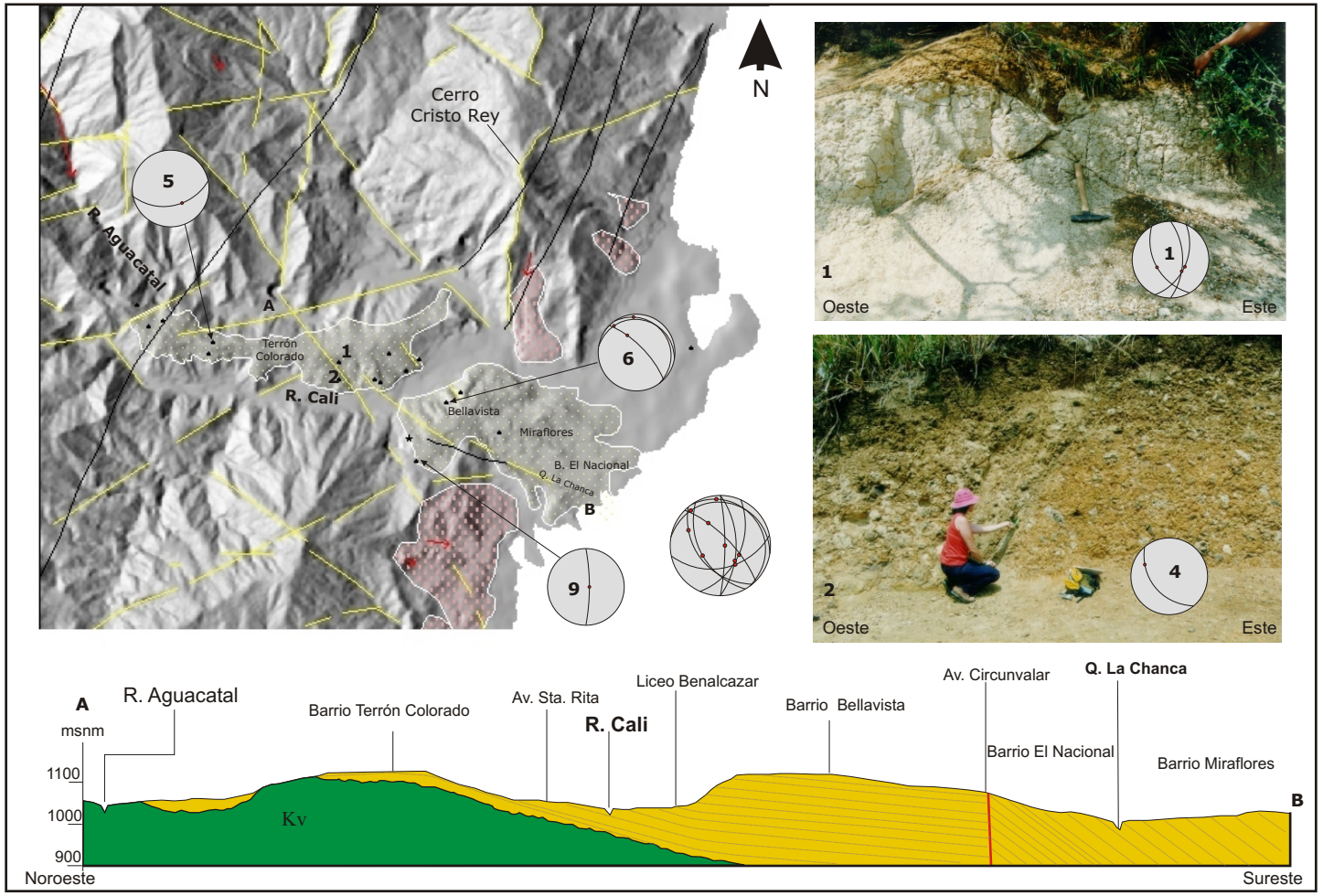


Figura 28. Abanico fósil de Cali afectado por fallamiento. Fotografía superior, capas de cenizas falladas en el sitio 1 señalado sobre el modelo de sombras. Fotografía inferior, flujo de detritos fallado en el sitio 2 señalado sobre el modelo de sombras. En el Corte A-B en sentido N40W se resaltan los depósitos del abanico en discordancia sobre la Formación Volcánica.

En la margen derecha del río Cali, en el Barrio Bellavista, Padilla (1994) identifica estratos del Paleógeno plegados en forma de un sinclinal apretado, asimétrico y con cabeceo al sur. Identificó fallas de estratificación y fallas en el cierre sinclinal y en la parte media de la estructura. En este trabajo se identificaron fallas paralelas a la estratificación en el sector de Bellavista (6 en Figura 28) la mayoría de tendencia NW con una componente principal de rumbo, afectando flujos de detritos. En el sector del Aguacatal también se midió una falla de estratificación en el contacto entre cenizas volcánicas y flujos de detritos con tendencia general EW y una componente principal en el buzamiento (5 en Figura 28). Sobre la Avenida Circunvalar, márgen derecha del Río Cali, se midió un plano de falla de dirección general NS y componente en el buzamiento (9 en Figura 28), esta falla afecta cenizas volcánicas.

Tabla 5. Datos estructurales Cali

Número	Plano de falla	Estría	Componentes desplazamiento
1	N30W/45SW	Plunge: 45SW	Inversa
2	N24E/45E	Plunge: 45E	Inversa
3	NS/55E	Plunge: 45E	Inversa sinestral
4	N40W/60SW	Plunge: 32NW	[a] Horizontal con componente vertical
5	N78E/41SE	Pitch: 70NW	[b] Horizontal con componente vertical
6	N80W/8E	Pitch: N40W	[c] Horizontal con componente vertical
7	N35W/8E	Plunge: 4NW	[d] Horizontal con componente vertical
8	N45W/68N	Pitch: N40W	Dextral normal
9	NS/90		

[a] En el tratamiento de los datos se asumió como falla inversa y por tanto sinestral
[b] En el tratamiento de los datos se asumió como falla normal y por tanto sinestral
[c] En el tratamiento de los datos se asumió como falla normal y por tanto dextral
[d] En el tratamiento de los datos se asumió como falla normal y por tanto dextral

Los rasgos de actividad tectónica más reciente en este sector de la Cordillera Occidental corresponden a fallas de deslizamiento de flexura, paralelas a la estratificación, que afectan una unidad de edad Cuaternaria. Aunque con muy pocos datos en el registro estratigráfico se puede ver que hay un sistema conjugado de fallas NS con componente vertical, fallas NW con componente de rumbo y fallas EW con componente vertical. La expresión en planta de los lineamientos NW en escalones derechos podría indicar una componente dextral para estas fallas identificadas en el registro estratigráfico. Adicionalmente las fallas NS observadas en el sector de Tory Castro son paralelas al eje regional de plegamiento de las unidades del Paleógeno, en este caso puede tratarse de fallas inversas conjugadas que forman un pequeño pop-up en este sector.

Referencias Consultadas

Alvarez, A., y S. Tenjo, 1971, Hidrogeología del Valle del Río Cauca entre Santander de Quilichao y el Río Sonso, Cali, C.V.C. : 71-4; Ingeominas:1568.

Blair, T. C., y J. G. McPherson, 1994, Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages: Journal of Sedimentary Research, v. A64, p. 450-489.

Cardona, F. J., y M. Ortíz, 1994, Aspectos estratigráficos de las unidades del intervalo Plioceno-Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta de definición para la Formación Pereira: Pregrado thesis, Universidad de Caldas, Manizales.

Hanks, T. C., y H. Kanamori, 1979, *b* values and w^{-g} seismic source models: Implications for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion: Jounal of Geophysical Research, v. 84, p. 2235-2242.

Hubach, E., y B. Alvarado, 1934, Geología de los departamentos del Valle y Cauca en especial el carbón, Bogotá, Servicio Geológico Nacional.

López, M. C., y H. Vokler, 2000, Evaluación de los niveles potenciométricos en el acuífero de Cali, Cali, Observatorio Sismológico del Suroccidente, Universidad del Valle, Corporación OSSO, p. 23.

López, M. C., A. A. Velásquez, y G. H. Toro, 2002, Transpresión activa en el Valle del Cauca-Colombia: III Jornadas de sismología histórica & III Coloquio sobre microzonificación sísmica – Camino hacia una menor vulnerabilidad. Caracas, Venezuela

López, M. C., A. A. Velásquez, G. H. Toro, F. A. Audemard, H. Meyer, y M. Hermelín, 2003, Avances de las investigaciones paleosísmicas en el Valle del Cauca: IX Congreso Colombiano de Geología. Conocer la tierra para un futuro mejor. Medellín, Colombia

McCourt, W. J., 1984, The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, v. Series 84, p. 8-49.

McCourt, W. J., y G. Verdugo, 1985, Mapa Geológico de Colombia, Plancha 300, Cali (1:100000): Ingeominas, Bogotá.

Miall, A. D., 1996, The geology of fluvial deposits. Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology: Berlin, Springer, 582 p.

Murcia, A., 1982, El vulcanismo Plio-Cuaternario de Colombia. Depósitos piroclásticos asociados a mediciones isotópicas de Sr 87/Sr 86, Nd 143/Na 144 y O18 en las lavas de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruíz, MagEl vulcanismo Plio-Cuaternario de Colombia. Depósitos piroclásticos asociados a mediciones isotópicas de Sr 87/Sr 86, Nd 143/Na 144 y O18 en las lavas de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruízazine, v. 10.

Neuwerth, R., F. S. Suter, C. A. Guzman, y G. E. Gorin, 2006, Soft-sediment deformation in a tectonically active area: The Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia): Sedimentary Geology, v. In Press.

Padilla, L. E., 1991, Propuesta de unificación para la nomenclatura estratigráfica del Terciario del Valle del Cauca: Boletín Geológico, Universidad Industrial de Santander, v. 20, No. 35, p. 5-17.

Pardo-Trujillo, A., M. Moreno-Sánchez, y A. d. J. Gomez-Cruz, 1994, Evidencias de actividad neotectónica en la carretera Cartago-Ansermanuevo (Valle del Cauca, Colombia): III Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, p. 181-191. Armenia, Colombia

Slemmons, D. B., 1977, State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States: faults and earthquake magnitude, Vicksburg, Mississippi, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils And Pavements Laboratory, p. 129.

Stanistreet, I. G., y T. S. McCarthy, 1993, The Okavango fan and the classification of subaerial fan systems: Sedimentary Geology, v. 85, p. 115-133.

Van Houten, F. B., y R. B. V. Travis, 1968, Cenozoic deposits, Upper Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 52, 4, p. 675-702.