

Significado de fracturas en la evolución estructural del Anticlinal de Monterralo, Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental de Colombia

Significance of fracture associations in the structural evolution of Monterralo Anticline, Eastern Foothills, Eastern Cordillera of Colombia

Nelson Sanchez-Villar¹, Andreas Kammer¹, Andres Mora², JAVIER TAMARA² & JORGE MONTAÑA¹

¹Grupo de Geología Estructural y Fracturas, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, A.A, 14490 Bogotá, Colombia. E-mail: nfsanchezv@hotmail.com

²Instituto Colombiano del Petróleo, Ecopetrol, A.A, 4185 Bucaramanga, Colombia. E-mail: andres.mora@ecopetrol.com

Nelson Sanchez-Villar, Andreas Kammer, Andres Mora, Javier Tamara & Jorge Montaña (2011): Significado de fracturas en la evolución estructural del Anticlinal de Monterralo, Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental de Colombia. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Edición Especial, 36 No. 1, pp 105-122

Manuscrito recibido: 10 de julio 2011; aceptado: 15 de agosto 2011

Resumen

El Anticlinal de Monterralo es parte de la faja de plegamiento-cabalgamiento del piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y es uno de los pliegues más desarrollados en amplitud y relieve estructural de este frente. Este pliegue presenta un eje con rumbo NE-SW, una asimetría con vergencia al sureste y un doble cabecceo. Fracturas se analizaron en 25 pavimentos con el fin de documentar la evolución cinemática de este pliegue. Los sets de diaclasas comprenden un sistema ortogonal con un set orientado paralelamente (NE-SW) y otro perpendicularmente (NW-SE) al eje de pliegue y un sistema ligeramente oblicuo al tren estructural con sets orientados N-S y E-W. Cada set de diaclasas se desarrollo durante el pre-plegamiento por su perpendicularidad a la estratificación. Durante el plegamiento se desarrollaron fallas normales y clivajes en unidades terciarias a lo largo de la zona de bisagra y clivajes en unidades cretácicas finas en el núcleo del pliegue, documentando mecanismos tipo buckling como la flexura ortogonal y el flujo por flexura. En este periodo pudo ocurrir también la intensificación los sets NW-SE y NE-SW. En la última fase de plegamiento los mecanismos de deformación del buckling se bloquean y el flanco frontal es afectado por fracturas tipo “stretching faults” que rotan y adelgazan tectónicamente el flanco frontal. En este estado se reactivan los sets NE-SW como fracturas de cizalla para acomodar las últimas fases de acortamiento lateral.

Palabras Claves: Anticlinal de Monterralo, set de diaclasas, mecanismos de plegamiento.

Abstract

Monterralo Anticline is located along the eastern foothills of the Eastern Cordillera fold and thrust belt and is one of the most developed folds in amplitude and structural relief of this front. This fold presents a fold axis trending NE-SW, an asymmetry with a southeastern vergence and a double plunge. Fracture sets were analyzed in 25 pavement maps in order to document the kinematic evolution of fold. Fracture sets comprehend an orthogonal system trending parallel and perpendicular to the fold axis and a system slightly oblique to the structural trend with sets trending N-S and E-W. These joints are interpreted as pre-folding sets by their perpendicularity to bedding. During folding were developed normal faults and cleavages in tertiary units along the hinge area and cleavages in Cretaceous fine units in the fold

core, documenting buckling mechanisms such as orthogonal flexure and flexural flow. At this stage also could occur new propagation of sets NW-SE and NE-SW. During a late stage of folding the buckling mechanisms are blocked and the forelimb is prone to stretching faults that generate a forelimb thinning and rotation. At this stage NE-SW sets is reactivated as reverse faults to accommodate the last period of lateral shortening.

Key Words: Monterralo Anticline, joint sets, fold mechanism.

INTRODUCCIÓN

Hasta años recientes el plegamiento-fracturamiento se relacionó usando el modelo propuesto por Stearns (1968), quien presenta los posibles escenarios de fracturas en un pliegue usando la geometría final este. Sin embargo no se incluyó la influencia de fracturas heredadas o formadas durante la amplificación del pliegue, donde actúan diferentes mecanismo de plegamiento. Este problema se observa cuando las diaclasas no presentan una orientación con el pliegue o por diaclasas que se presentan inclinadas con respecto a la estratificación. Para pliegues tipo buckling se han realizado avances para relacionar las fracturas con mecanismos de plegamiento tal como el deslizamiento por flexura y el flujo por flexura (Engelder & Peacock 2000, Fischer & Jackson 1999). Otros autores han relacionado las fracturas y la deformación con los modelos de pliegues asociados a fallas. En pliegues por flexión de falla las deformaciones son mayores en flancos que en cresta (Salvini & Storti 2001, Salvini & Storti 2004). Los modelos de charnela fija asociados a detachment con rotación de flancos proponen una mayor deformación en charnela (Ramsay & Huber 1983, Salvini & Storti 2001) y en pliegues por propagación de falla la deformación se distribuirá dependiendo del ángulo de la falla (Salvini & Storti 2001). Otros aportes han venido en la interpretación de los sets pre-plegamiento. En rocas sub horizontales se ha mostrado como es común el desarrollo de diaclasas perpendiculares a la estratificación, las cuales se han relacionado al acomodamiento de poca deformación en ambientes tectónicos frágiles donde las capas son pre-tensionadas, “pre-stressed” (Reches 1976, Nickelson & Hough 1967). Más recientemente sobre el Anticlinal de Emigrant Gap, Wyoming, se ha mostrado como un set pre-plegamiento bien desarrollado controla la intensificación de diaclasas formadas durante el plegamiento, donde estas se desarrollan preferencialmente paralelas a las pre-plegamiento (Bergbauer & Pollard 2004). En Wyoming

sobre el Anticlinal de Sheep Mountain se han determinado a partir de observaciones de campo y modelos numéricos, como las fracturas pre-plegamiento localizadas en la cresta con un rumbo paralelo al eje se abren durante el plegamiento, mientras diaclasas en flancos se reactivan como fallas inversas. El desplazamiento sobre las fracturas y a lo largo de la estratificación son mayores en el flanco frontal más inclinado que en el flanco trasero menos inclinado (Behllasen et al. 2006, Sanz et al. 2008).

En pliegues del Piedemonte Llanero se ha documentado la existencia de 4 sets de diaclasas perpendiculares a la estratificación (NW-SE, NE-SW, E-W y N-S) (Castellanos 2009, Montaña 2009). En el Anticlinal de Tierranegra, un pliegue amplio de este frente (Figura 1), se mostró como los sets NE-SW y NW-SE se desarrollaron previos al plegamiento ya que mantienen su orientación, paralelismo y perpendicularidad con respecto a la estratificación incluso en el cierre periclinal sur del pliegue. Para este mismo pliegue el set de mayor longitud en flancos es el NE-SW, mientras en el Anticlinal de Silbadero, pliegue de flanco frontal invertido (Figura 1), se mostró como el set NW-SE es el de mayor longitud. Los sets oblicuos E-W y N-S son poco comunes y aparecen distribuidos en las diferentes posiciones estructurales de los dos pliegues mencionados (Castellanos 2009, Montaña 2009). Con el fin de mejorar el entendimiento de cómo se distribuyen estas fracturas en un pliegue con mayor relieve estructural que los previamente estudiados, se tomaron e interpretaron datos de fracturas a lo largo del Anticlinal de Monterralo en superficie (Figura 1). Este modelo permitirá una evaluación de las fracturas en superficie sin sesgos de escala, orientación o cinemática, problemas que se enfrentan en la evaluación de fracturas en el subsuelo. Aunque la investigación se realiza sobre un anticlinal que no representa un prospecto, este es un modelo análogo idóneo para el entendimiento de estructuras adyacentes que albergan hidrocarburo.

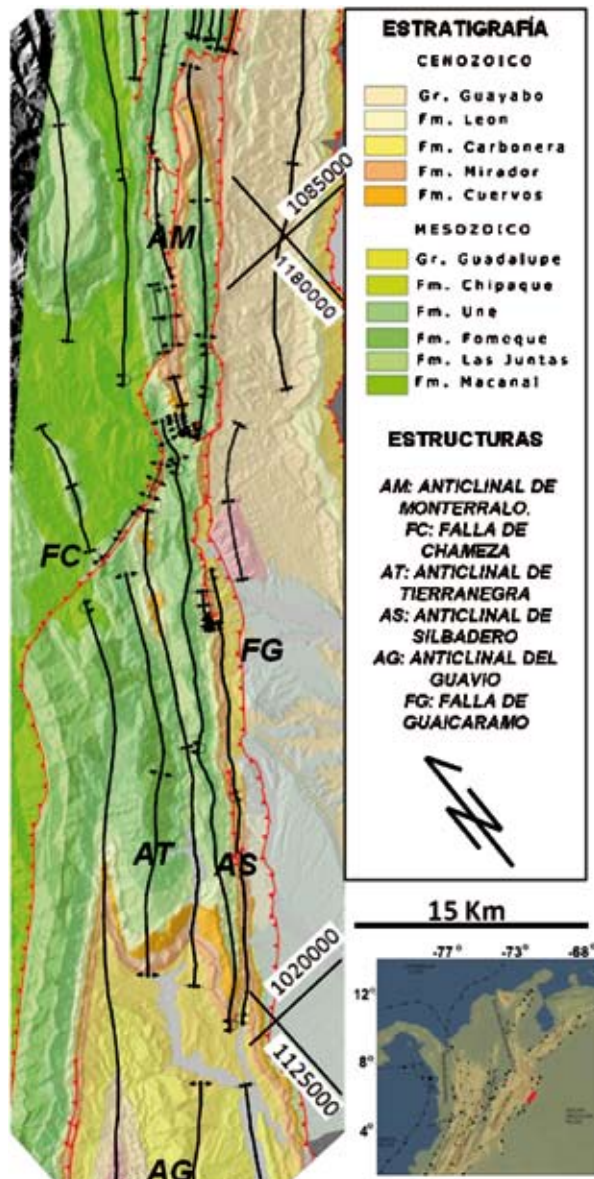


Figura 1. Mapa geológico del Piedemonte Llanero entre Aguazul y Yopal.

MARCO GEOLÓGICO

El flanco oriental de la Cordillera Oriental, donde se encuentra el Anticlinal de Monterralo (Figura 1), presenta un arreglo de fallas de inversión con una geometría en echelon, que migran hacia el este de sur a norte al tiempo que hay una pérdida de relieve estructural en el bloque colgante de las fallas y un ensanchamiento de la cordillera (Mora 2007). El Anticlinal de Monterralo se ubica al norte de uno de estos relevos representado por la Falla de Chámeza (Figura 1). Litológicamente

la franja de estudio involucra secuencias tectono-sedimentarias con edades Cretácicas y Terciarias, separadas por discordancias entre ellas (Figura 3). Las unidades Cretácicas son caracterizadas por una sucesión de formaciones competentes (arenitas) e incompetentes (shales) depositadas en un mar somero, tipo cuenca de retro arco (Dengo & Covey 1993). Las unidades terciarias involucran sucesiones de ambientes continentales y marinos depositadas en una cuenca de foreland (Dengo & Covey 1993). En superficie el Anticlinal de Monterralo marca un pliegue asimétrico de doble cabeceo que se extiende por una longitud de 40 km, con un ancho máximo de 5 km (figuras 2 y 4). Al norte es un pliegue sub-cilíndrico con cierre cilíndrico y al sur es un pliegue no cilíndrico (Figura 2). El flanco frontal del pliegue es limitado por la Falla de Guaicaramo y el flanco trasero por la Falla de Tamara (Figura 4). En el subsuelo el área presenta una tectónica en dos pisos estructurales. En el piso inferior donde está localizado el Anticlinal de Monterralo se conforma por una sucesión de escamas que se cabalgan mutuamente (Figura 4). Cada escama presenta un anticlinal fallado con flanco frontal vertical ha invertido y flanco trasero corto que forma un sinclinal contra las fallas. En el piso tectónico superior y separado del inferior por un retro cabalgamiento que despega en la base de la Formación Carbonera está el Sinclinal de Nunchia (Figura 4).

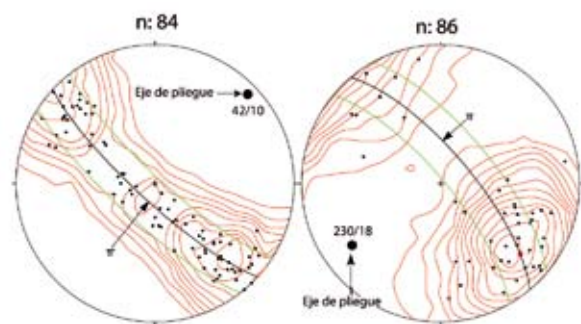


Figura 2. Proyección estereográfica sobre el hemisferio inferior de los polos de estratificación del Anticlinal de Monterralo, con el eje de pliegue y su círculo mayor (plano π). Las líneas verdes representan planos a 20° del plano π . Izquierda, Proyección área norte. La mayor cantidad de polos cae entre los planos verdes, permitiendo clasificarlo como un pliegue sub-cilíndrico (Ramsay & Huber 1983). Derecha, Proyección del área al sur del pliegue. Nótese la gran dispersión de polos de estratificación que se sale de los planos verdes permitiendo clasificarlo como un pliegue no cilíndrico (Ramsay & Huber 1983).

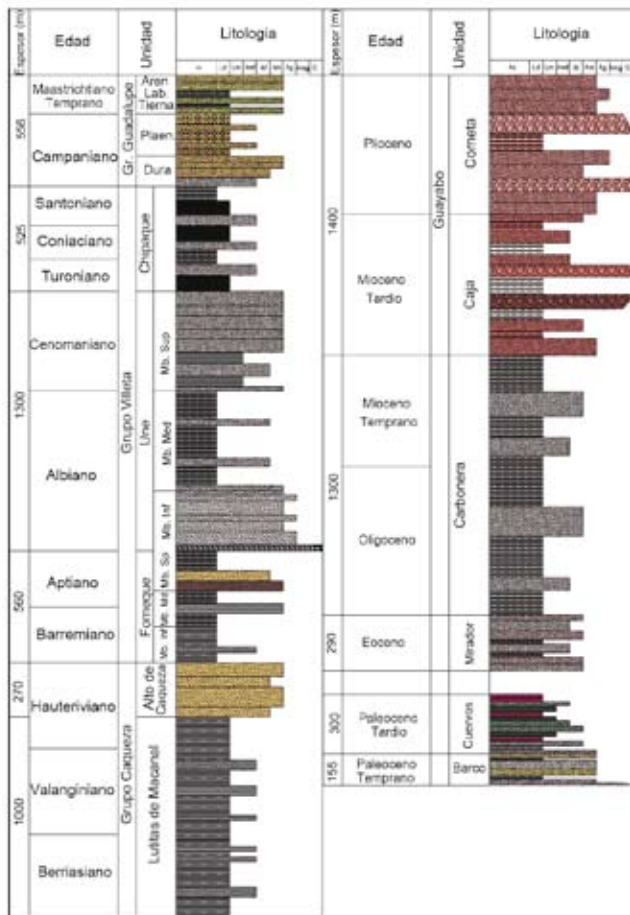


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada del Anticlinal de Monterralo.

METODOLOGÍA

El análisis de los sets de fractura se llevó a cabo en 27 estaciones sobre vista de estratificación o pavimentos y en 4 estaciones sobre vista de corte o sección, abarcando el cierre norte y flanco frontal del pliegue e involucrando las Formaciones Une, Barco, Cuervos, Mirador y Carbonera (Figura 8). En cada estación se documentó la orientación de fractura (azimut, buzamiento), el tipo de fractura (extensión o cizalla), arquitectura y morfología. Aparte del análisis cinemático se tomó una foto lo más perpendicular posible al pavimento para analizar las relaciones de corte y la longitud media de los sets de fractura.

La mala exposición de los pavimentos, principalmente en el flanco frontal debido a la vegetación, limitó el tamaño de los mismos, siendo por lo general de no más

de una decena de metros (e.g. Anexo 5), en otros casos las fotos se tomaron de manera panorámica y los datos se recolectaron a la base del estrato (e.g. Anexo 3). Las orientaciones de las diaclasas fueron analizadas en el programa Stereonet® (Allmendinger 2003), donde cada estación presenta los círculos mejor ajustado por set de diaclasa, determinados por el programa y los polos de diaclasas (ver Anexo 5). Las fallas se analizaron con la ayuda del programa Faultkin® (Allmendinger 2003), utilizando la proyección sobre el hemisferio inferior. Cada análisis de fallas presenta una solución para los esfuerzos principales a través del método P-T, acompañado de los cuadrantes de presión y tensión. El análisis de las fallas involucró además la rotación del círculo mejor ajustado por set de falla con respecto a la estratificación para examinar si estos planos manifiestan una relación perpendicular a la estratificación, con lo cual se pueden asociar a posibles planos de diaclasas reactivados. Para establecer el parámetro de longitud promedio usado en el mapa de la Figura 8, en cada pavimento se usaron las digitalizaciones de AutoCad, las cuales se corrieron en el programa desarrollado por Robles et al. (2007), que se basa en el método de ventanas circulares propuesto por Rohrbaugh et al. (2002).

Datos estructurales: Fallas y diaclasas

En el Anticlinal de Monterralo se diferencian 4 sets de diaclasas con inclinaciones de 75° a 90° en estado rotado (Figura 8). Dos sets ortogonales entre sí, son orientados paralela y perpendicularmente al eje del pliegue. Otros dos sets ortogonales entre si se orientan en dirección N-S y E-W. Los sets paralelos y perpendiculares al eje de pliegue se denominaron en este trabajo como Dab (NE-SW), Dac (NW-SE), Eab (N-S) y Eac (E-W). Esta nomenclatura se estableció a partir de un pliegue formado por una cizalla sencilla y heterogénea en la cual hay un eje **a** que representa la dirección de cizalla, un eje **b** o eje del pliegue y un eje **c** con la dirección de acortamiento (Figura 6). Sobre la foto, las digitalizaciones del set Dac así como para los estereogramas se denotaron en color rojo, para el set Dab azul, para el Eac en magenta y para el Eab en cian (e.g. figs. 6, 8 y Anexos). Los 2 sistemas ortogonales se interpretan como diaclasas por constituir superficies planas y regulares sobre las que no existe un desplazamiento evidente a escala mesoscópica, además de presentar un arreglo de diaclasas continuas que limitan otras más cortas perpendiculares (e.g. Pollard

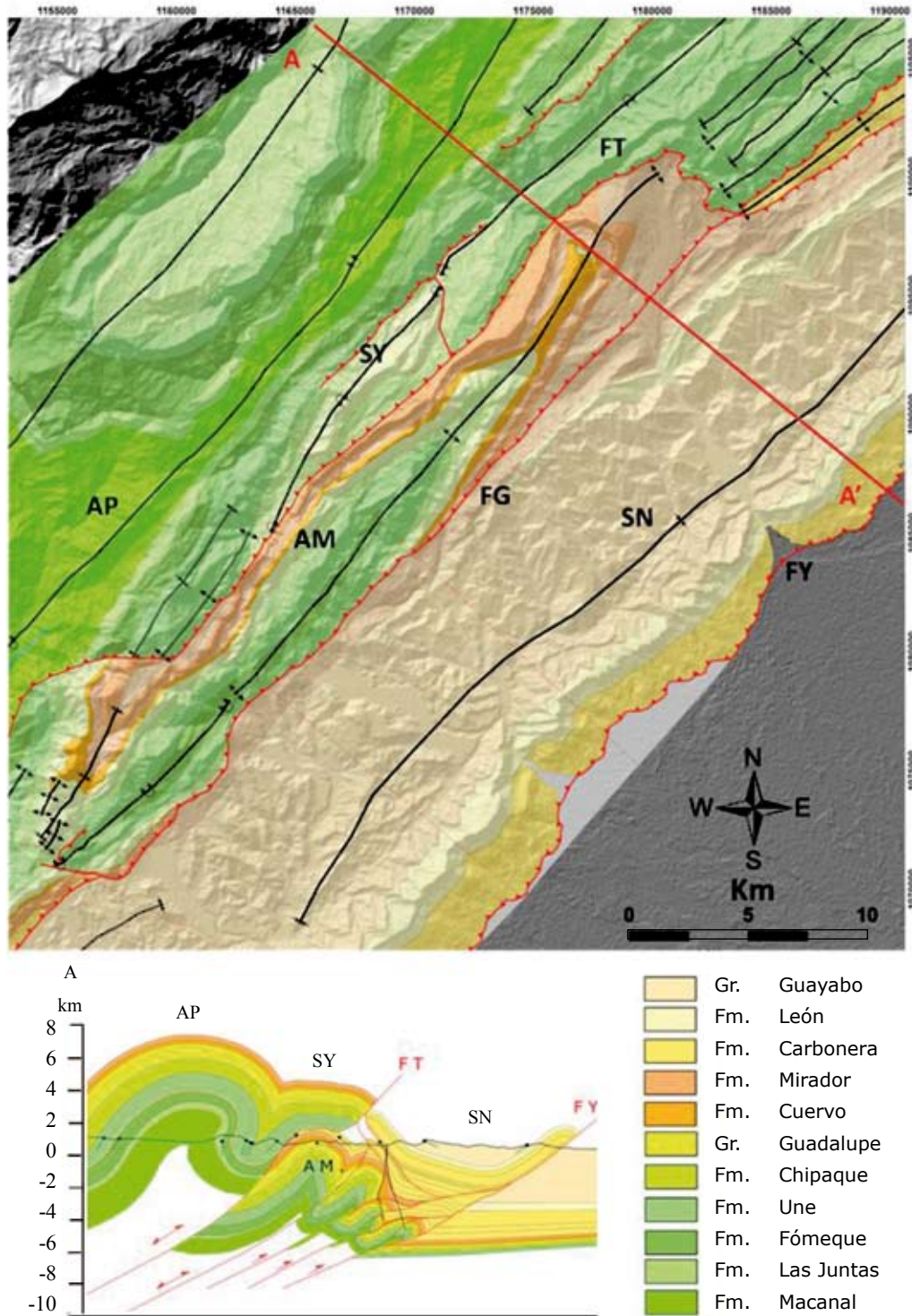


Figura 4. Mapa geológico del área del Anticlinal de Monterrolo. Abajo, sección (A-A') mostrando las estructuras del subsuelo. AP: Anticlinal de Paya, SY: Sinclinal de los Yopos, FT: Falla de Tamara, AM: Anticlinal de Monterrolo, SN: Sinclinal de Nunchia, FY: Falla de Yopal, FG: Falla de Guaicaram.

& Aydin 1988 y Anexo 5). La presencia de plumas a lo largo de los 4 sets de diaclasas en diferentes posiciones estructurales también permite concluir acerca del carácter extensivo de las fracturas, como se puede ver en Figura 5 (e.g. Bahat & Engelder 1984). La existencia de venas en algunas estaciones también concluye el diaclasamiento (Figura 9). Por otro lado se analizaran los sets de

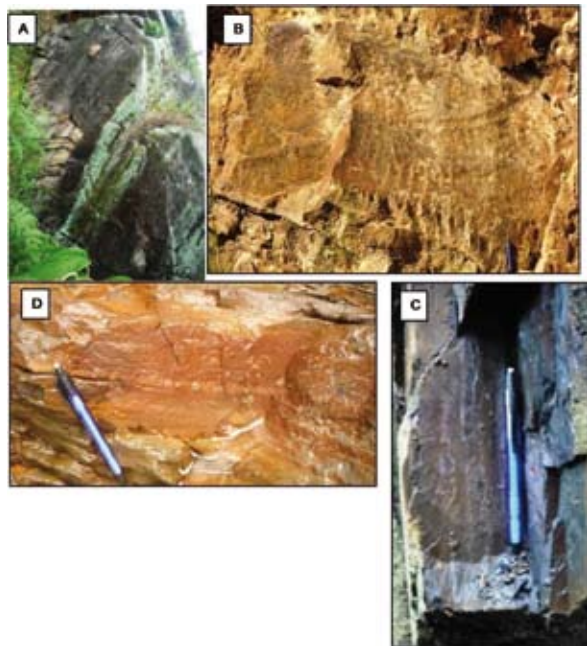


Figura 5. Estructuras en pluma sobre diferentes sets de diaclasas en el Anticlinal de Monterralo. A) set Eac, Formación Une, flanco frontal. Longitud de afloramiento: 3m B) set Eac, Formación Cuervos, Cresta. C) set Dac, Formación Une, flanco frontal. D) set Dac, Formación Carbonera, flanco trasero.

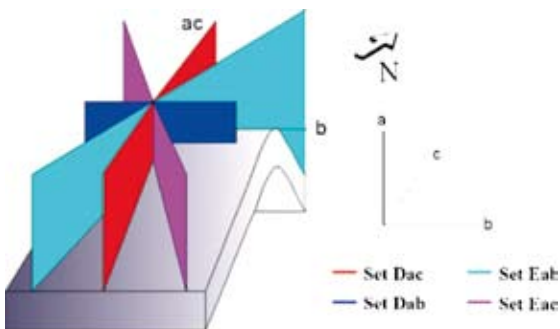


Figura 6. Esquema que ilustra la nomenclatura usada para los sets de diaclasas encontrados en el Anticlinal de Monterralo.

fallas encontrados en este pliegue teniendo en cuenta si ellos representan diaclasas reactivadas o fracturas neo-formadas. Para un perfil transversal idealizado se diferenciaron 5 casos. El caso **I** (fallas normales) se presenta en la Formación Mirador y Cuervos en el cierre norte sobre dominios del flanco trasero, cresta y flanco frontal del pliegue. Los casos **II** a **V** son fallas inversas que se presentan en el flanco frontal.

FALLAS

Caso I. En el flanco trasero, al SW de la sección A-A', se analizó un pavimento a escala kilométrica en la Formación Mirador a través de una foto satelital, que muestra un arreglo de fallas normales paralelas al eje del pliegue con longitudes kilométricas (Anexo 1). A escala métrica, este pavimento revela un sistema de fallas conjugadas (Figura 7 y Anexo 1). Cerca a la cresta a lo largo de la sección A-A', en la Formación Cuervos, estas fallas forman pliegues de arrastre y cortan capas de lodolitas y arenitas. En capas de lodolitas además se encuentra un clivaje y fallas inversas, las cuales se presentan en planos conjugados. Tanto las fallas normales e inversas como los clivajes presentan una orientación paralela al eje del pliegue y las fallas normales cortan los clivajes (Anexo 2). En el flanco frontal las fallas normales afectan capas que buzcan más de 45° desplegando las mismas características del flanco trasero. Los sets de fallas descritos presentan un Sh_{max} perpendicular al eje de pliegue y afectan las unidades adelgazándolas tectónicamente (Figura 7).

Caso II. Fallas inversas destrales con un rumbo paralelo al eje del pliegue (Anexo 3). Este set fue analizado en la Formación Mirador, cierre del pliegue. La solución de los esfuerzos muestra un Sh_{max} con dirección E-W. Este caso es el único de los presentados

Aquí que al ser rotado con la estratificación es perpendicular a esta, con una orientación igual al set Dab, con lo cual se toma aquí como un set Dab reactivado bajo una contracción E-W. Este sistema adelgaza la capa y la rota horariamente, congruente con un arrastre e inversión de las capas en el flanco frontal (Figura 7).

Caso III. Bandas de cizalla que buzcan hacia el este en capas invertidas (Anexo 4A). La solución de esfuerzo muestra un Sh_{max} con dirección NW-SE perpendicular a la capa. Este set genera un adelgazamiento de la capa y una rotación anti horaria (Figura 7).

Caso IV. Fallas inversas de alto ángulo que buzcan menos que el buzamiento de la capa (Anexo 4B). La solución del esfuerzo Sh_{max} tiene dirección NW-SE perpendicular a la capa. Este fallamiento origina un adelgazamiento de la unidad por compresión perpendicular a la capa y extensión en la dirección de la misma hacia arriba. Otro efecto es una rotación anti horaria (Figura 7).

Caso V. Fallamiento inverso que buza hacia el flanco trasero, en la misma dirección de las capas invertidas (Anexo 4C). La solución del esfuerzo Sh_{max} muestra una dirección NW-SE. Este caso invierte y adelgaza las capas del flanco frontal (Figura 7).

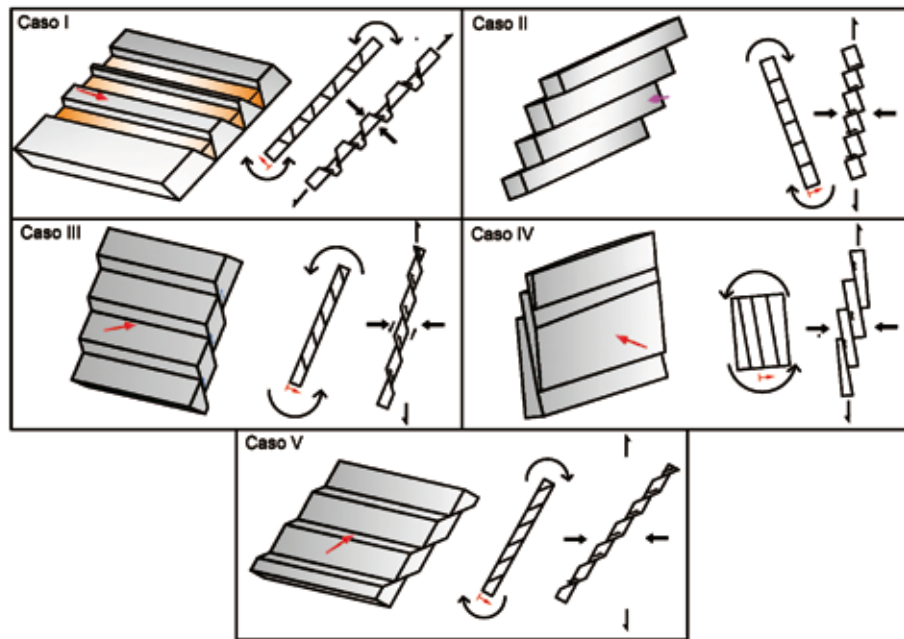


Figura 7. Vista 3D (izquierda) y 2D (centro y derecha) que ilustra cómo afectan las fallas las capas según el caso de estudio, ver texto para discusión. En el centro se analiza la rotación del estrato y en la derecha se analiza el adelgazamiento tectónico del estrato.

DIACLASAS

Flanco trasero: Este flanco presenta los 4 sets de diaclasas (Eac-Eab y Dab-Dac) (Figura 8 y Anexo 5A). En este flanco no se observa una única relación de intersección sistemática en los pavimentos ya que en general hay relaciones de corte mutuo.

Cierre del pliegue y cresta: Sobre la cresta, en la sección A-A', Formación Cuervos (Anexo 2), se midieron los sets Eac y Dab, pero sin determinar las relaciones de corte. Más al norte, sobre el cierre del pliegue donde las capas son horizontales, en la Formación Mirador, este dominio presenta los sets Eac-Eab como los más continuos y de mayor longitud (Figura 8 y Anexo 5B), allí las fallas normales son marginales y solo se encontraron en la

estación 8 (Figura 8). En la mayoría de pavimentos el set Eab es el más largo y limita al set Eac y los sets Dab-Dac son ausentes o limitados por otros.

Flanco frontal: Este flanco presenta los 4 sets de diaclasas. En la mayoría de pavimentos el set de mayor longitud es el Dac y en menor grado el set Eac (Figura 8 y Anexo 5C). En la mayoría de casos estos sets siempre están acompañados por dos o tres de los otros sets, aunque se pudo determinar los de mayor longitud no se pudo determinar una temporalidad clara entre las diferentes diaclasas por no existir relaciones de corte únicas.

Núcleo del Pliegue: En el núcleo del pliegue se analizaron deformaciones en la Formación Fómeque. Esta unidad presenta un clivaje en planos discretos (Figura 9) y venas

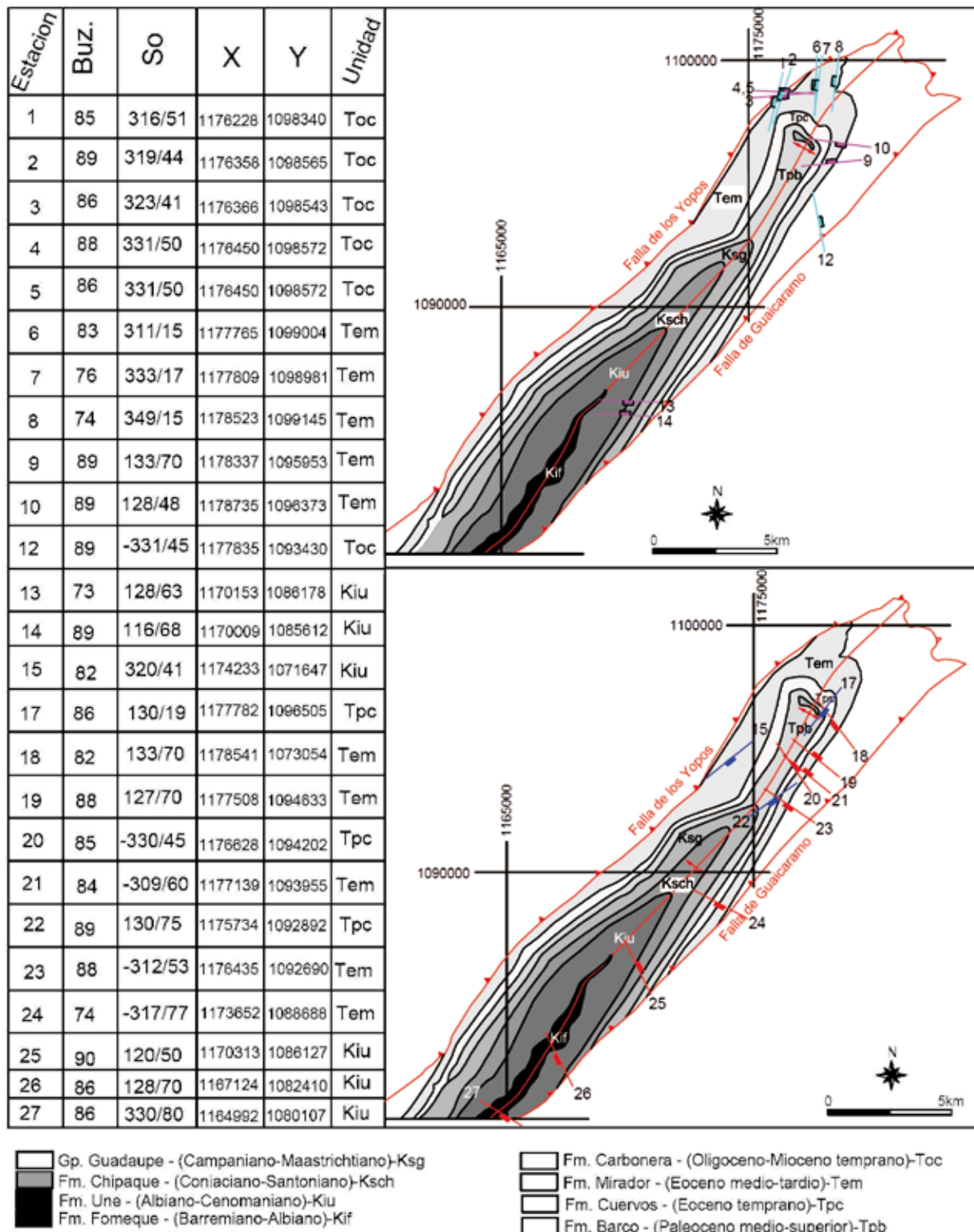


Figura 8. Mapa geológico del Anticlinal de Monterralo mostrando estaciones con pavimentos. El dato estructural representa el rumbo y buzamiento promedio en estado rotado del set de diaclasas con mayor longitud encontrado en ese pavimento. La tabla de la izquierda muestra tanto el buzamiento promedio del set como la estratificación de la capa. Los números negativos representan buzamientos invertidos.

de calcita con dirección del set Dac (Figura 9 y Anexo 5D), donde las venas no se encontraron en unidades supra yacentes. Según la nomenclatura de Bons (2000) al microscopio las venas presentan crecimientos antitaxiales y una morfología en bloque alargado.

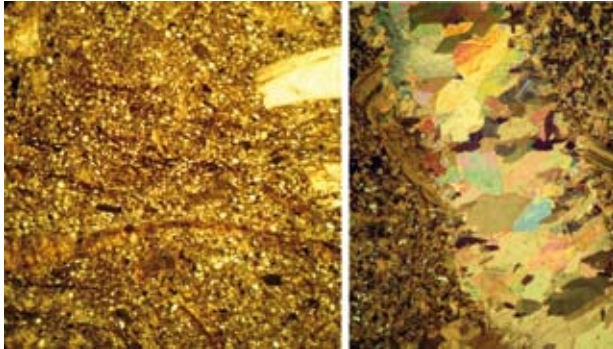


Figura 9. Detalles microscópicos de la estación 31 de una esparita fosilífera limosa, Formación Fômeque. Izquierda, Foto en luz polarizada paralela (PPL) del clivaje anastomosado, ancho de la foto 3 mm. Derecha, Foto en luz polarizada cruzada (XPL) de una vena Dac de calcita con morfología en bloque alargado, ancho de la imagen 2 mm.

DISCUSIÓN

Estadio de pre-plegamiento a plegamiento-temprano:

El sistema Eac-Eab se encuentra en el cierre norte sobre capas sub-horizontales, en el flanco trasero y flanco frontal, manteniendo siempre una perpendicularidad con la estratificación (Figura 8 y Anexo 5). Por otro lado el sistema Dab-Dac se presenta en el flanco trasero y el Dac principalmente sobre el flanco frontal más deformado, pero es virtualmente ausente en el cierre poco deformado (Figura 8 y Anexo 5). A partir de esta observación se plantea un origen pre-plegamiento para los sets oblicuos y sin-plegamiento para los sets Dab-Dac (Figura 11A). Pero al observar la relación perpendicular del sistema Dab-Dac con la estratificación es necesario preguntarse en qué

medida son pre-plegamiento y cual es su relación cronológica con el sistema Eab-Eac. En este punto al no tener temporalidades entre los sets de diaclasas, el estadio más temprano de deformación permanece incierto, con lo cual se abordará el problema desde una óptica estocástica con el planteamiento de varios escenarios posibles. Siendo así, al ver la orientación y perpendicularidad con la capa del sistema Dab-Dac en otros pliegues cercanos como el Anticlinal de Silbadero y Tierranegra (Montaña 2009, Castellanos 2009) y donde

existen cierres cónicos y cabeceos de estos pliegues, se puede proponer un desarrollo pre-plegamiento de los mismos. En este caso el set Eac y Eab se pudo formar posterior al sistema Dab-Dac pre-plegamiento pero en los estadios más tempranos del pliegue para poder desarrollarse perpendicular a la estratificación en varios dominios, entre ellos el flanco frontal (Figura 11B). Para cualquiera de los dos modelos propuestos el sistema Eab-Eac pudo desarrollarse en áreas con baja deformación, no asociadas al pliegue como el cierre del pliegue en fases tardías. Esto último del hecho que la reactivación del set Dab como fallas bajo una contracción E-W (Anexo 3) es muestra de que este esfuerzo no solo pudo actuar en estadios tempranos generando el set Eac sino también en estadios más tardíos. En este punto, para dar un contexto regional a las posibilidades mostradas, se examinara la naturaleza de los esfuerzos que dieron origen al pliegue y a las diaclasas. En la dirección de los sets de diaclasas en el Anticlinal de Monterralo se puede interpretar un Sh_{max} E-W para el set E-W y otro NW-SE para la generación del pliegue y el sistema Dab-Dac sin-plegamiento. Teniendo en cuenta que el set Eac no mantiene relación con el tren estructural de las fallas y pliegues del área se plantea un carácter lejano para el Sh_{max} E-W. Por otro lado un Sh_{max} NW-SE podría ser de carácter lejano o local. Si el Sh_{max} NW-SE es regional existiría una rotación de convergencia para el área de los esfuerzos regionales lo cual implicaría cambios en el arreglo de las placas. Sin embargo alternativamente se podría plantear la hipótesis de un Sh_{max} E-W siempre lejano donde el plegamiento se debió a esfuerzos locales (Figura 11A). Por lo tanto el plegamiento pudo ser episódico o al menos con velocidad variable donde fases de “quietud” hubiesen sido dominadas por el esfuerzo lejano. En fases de mayor actividad de plegamiento, los esfuerzos generados por el pliegue pudieron imponerse, ambos de manera alterna. En un escenario con esfuerzos regionales y de pliegue es posible gracias a una partición de la deformación en un régimen destráil transpresivo, donde el plegamiento solo acomodo acortamiento y las fallas componentes de rumbo. Se podría esperar que el set Eac fuera el primero en desarrollarse y a medida que ocurría transpresión y compresión del pliegue se generarían los otros sets de diaclasas (Dab-Dac), y en estadios de quietud localmente la generación del Eac (Modelo 1, Figura 11B).

Estadio sin-plegamiento: las fallas normales se encuentran en el flanco trasero, cresta y en rocas verticales del flanco frontal, pero en el cierre más norte (zona con baja deformación) son ausentes. En cada dominio se

caracterizan por presentarse como un par conjugado con respecto a la estratificación y con una dirección paralela al eje del pliegue. A partir de estas observaciones se espera una relación intrínseca entre el desarrollo del pliegue y estas fallas. De igual manera los clivajes y fallas en la parte externa del pliegue sobre la Formación Cuervos mantienen un paralelismo con el eje de pliegue, al igual que los clivajes en las partes más internas sobre la Formación Fómeque (Figura 9 y Anexo 2). Cada uno de estos rasgos puede ser desarrollado para varios tipos de pliegues asociados a fallas, sin embargo un examen del plegamiento a mayor escala, se revela que los pliegues por encima y por debajo de la Falla de Guaicaramo son retro deformables a un estadio intermedio de plegamiento asociable a un periodo de buckling previo a la falla de Guaicaramo (Mora et al. 2011). Partiendo de esta hipótesis cada rasgo estructural se asociaría a un mecanismo de deformación del buckling. Mas puntualmente las fallas normales se asociaría a la flexura ortogonal, donde clivajes y fallas inversas en las partes externas e interiores del pliegue a un flujo por flexura (Figura 10). En general la Figura.10 muestra los patrones de deformación para el buckling en una única capa, pero como se esperaría de una secuencia de litologías finas y gruesas como la observada en el Anticlinal de Monterralo, varios mecanismos de plegamiento pudieron actuar durante la formación del pliegue y a lo largo del pliegue. Tomando el buckling como mecanismo principal, el flujo por flexura y ortogonal operan solo para buzamientos moderados a suaves donde pliegues más apretados presentan principalmente aplastamiento homogéneo o por transferencia de masa (Behzadi & Dubey 1980). Se espera así la formación de estos rasgos en un pliegue con una amplitud intermedia. Otro hecho de este tipo de deformación es la posibilidad del desarrollo de diaclasas tanto paralelas como perpendiculares al eje (Figura 10). En el caso del sistema Dab operaría por la flexura ortogonal tanto con acortamiento como sin acortamiento paralelo a la capa (Figura 10). Pero el desarrollo del set Dab solo funcionaría con acortamiento paralelo a la capa, teniendo un mejor desarrollo en flancos como se observa en el pliegue (Figs. 8 y 10).

Estadio de plegamiento tardío: Durante este periodo de tiempo se reactiva el set Dab como fallas inversas (Figura 11 y Anexo 3). Esto unido a la presencia de fracturas de cizalla extendidas a lo largo del flanco frontal documenta un periodo de intensa deformación donde el fracturamiento no acomoda más diaclasas, si no cizallas que se encargan de rotar y adelgazarse tectónicamente el flanco. Durante este periodo se esperaría que el flanco

frontal se invirtiera y adelgazara tectónicamente como indica la cartografía geológica realizada. De la Figura 7 los casos 3 y 4 llaman la atención, ya que las fracturas rotan la capa horariamente como no se esperaría, con lo cual muestra la no heterogeneidad del proceso de inversión de flanco. Este comportamiento debería mostrarse como un rasgo local debido al desarrollo en algunas partes del flanco frontal de un solo set de un par conjugado de fallas que pudieran actuar por ejemplo cuando los esfuerzos son perpendiculares a la capa.

CONCLUSIONES

La perpendicularidad de los diferentes sets de diaclasas documentan un desarrollo temprano de los mismos, pero la ausencia de una cronología determina un análisis estocástico de las diaclasas en este pliegue donde varios escenarios son plausibles. En el primero y más ajustado a las observaciones el sistema Eab-Eac corresponde a pre-plegamiento y el sistema Dab-Dac a sin-plegamiento, donde el sistema Eab-Eac se pudo desarrollar en fases tardías en lugares con baja deformación en el pliegue (Figura 11A). En un segundo modelo el set Dab-Dac se formó sin-plegamiento, pero en los primeros estadios del pliegue los esfuerzos rotaron para dar paso a la formación del set Eac-Eab, el cual se desarrolló en diferentes dominios. Luego durante el pliegue el set Dab-Dac se intensificó (Figura 11B). Durante el plegamiento se desarrollaron fallas normales en las partes externas del pliegue, además de clivajes en los niveles superiores del pliegue y en el núcleo del mismo, documentando mecanismos buckling como la flexura ortogonal y el flujo por flexura. Ya en las últimas fases del plegamiento los mecanismos de buckling se bloquearon para dar paso a la formación de fracturas de cizallas que acomodan una mayor deformación en el flanco frontal que sufre rotación y adelgazamiento tectónico. En este punto se reactivan el set Dab como fallas.

Agradecimientos

Al proyecto “Cronología de la deformación en las Cuencas Subandinas” de Ecopetrol-Instituto Colombiano del Petróleo por financiar este estudio. A Thomas Maurin, Jonas Kley, Camilo Montes y Roberto Linares por la revisión de este artículo y sus comentarios enriquecedores.

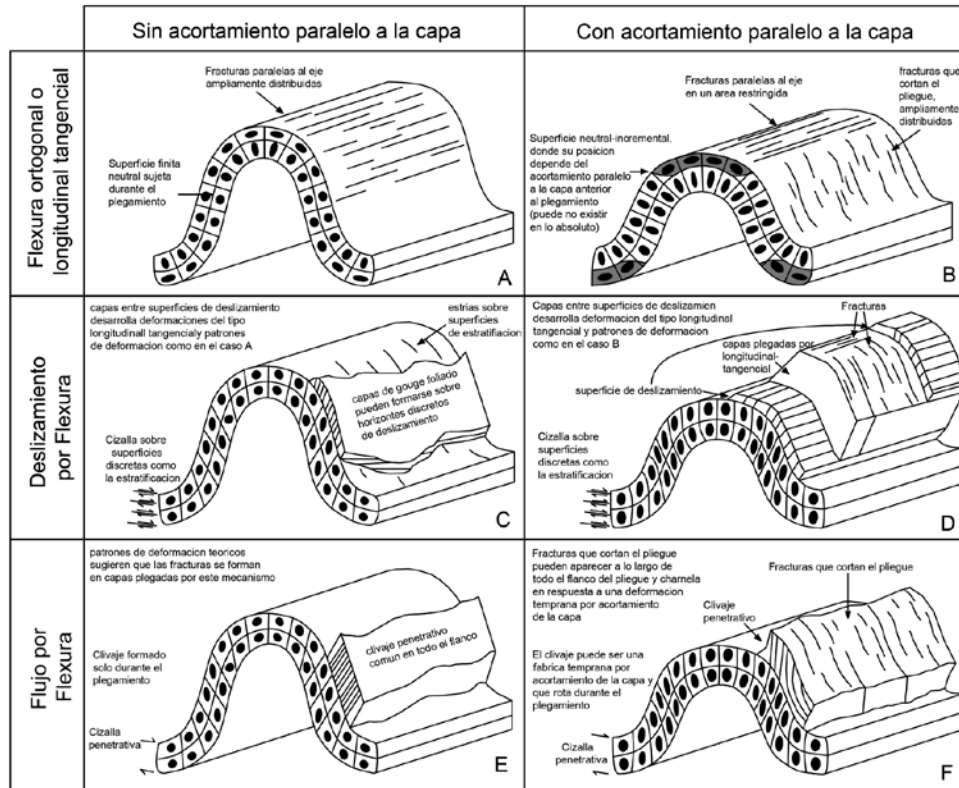


Figura 10. Esquemas de los patrones de deformación y esfuerzos en un plegue de una única capa, deformado por flexura ortogonal o longitudinal tangencial, deslizamiento flexural y flujo flexural, con o sin acortamiento paralelo a la capa. Tomado y modificado de Fischer & Jackson (1999).

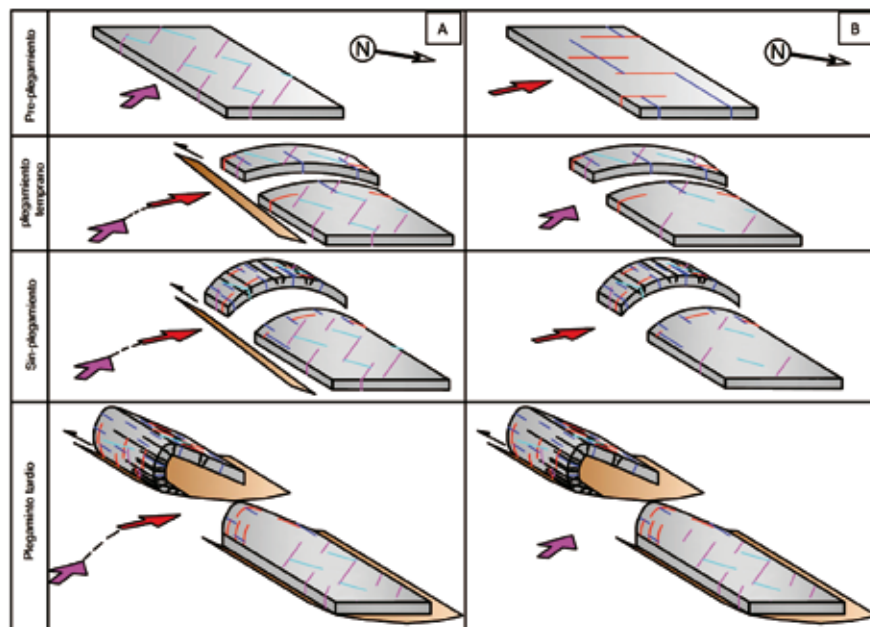
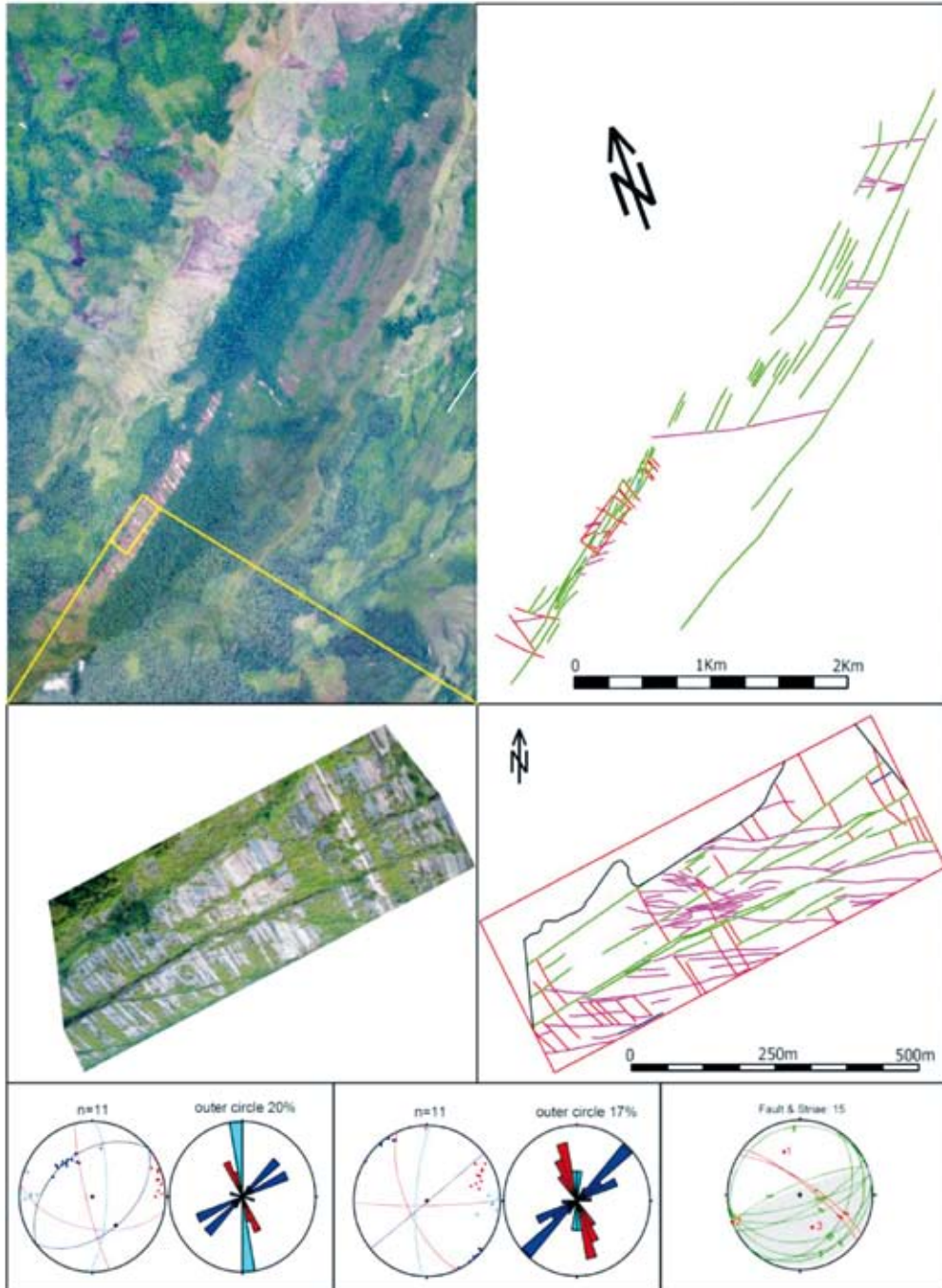
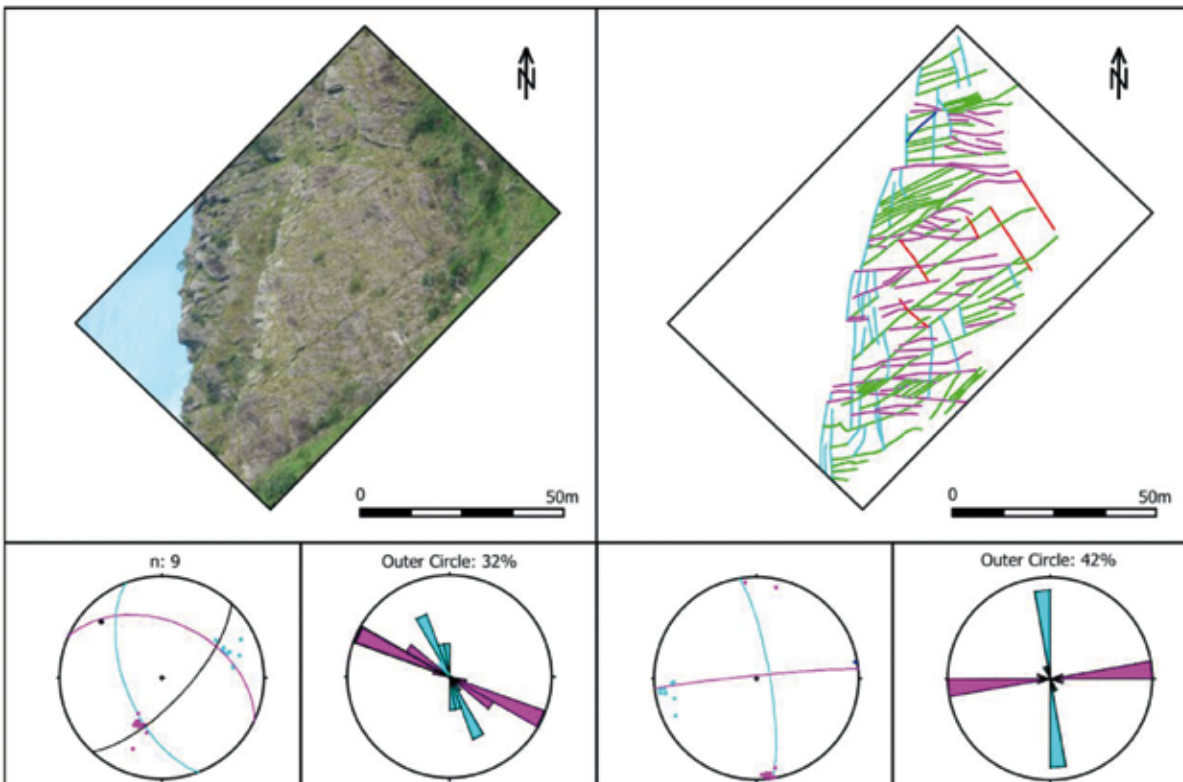
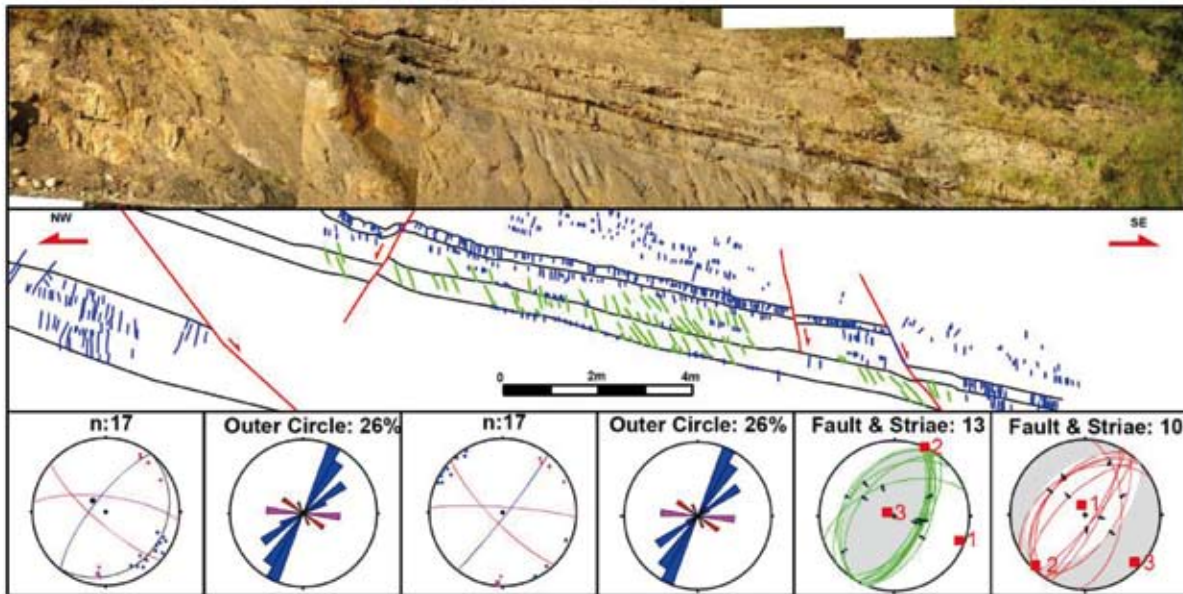


Figura 11 Modelos conceptuales de la evolución de las fracturas en el Anticinal de Monterralo para la Formación Mirador. A) modelo según el cual el set Eac-Eab es temprano y el set Dab-Dac sin-plegamiento. La rotación de los esfuerzos pudo ser regional o como se esboza en la imagen local y transpresivo para una contracción NW-SE y regional para el E-W, ver texto para discusión. B), modelo según el cual el set Dac-Dab es pre-plegamiento y se intensifica durante el plegamiento. Mientras el set Eac es temprano en el plegue pero afecta las áreas en fases más tardías.

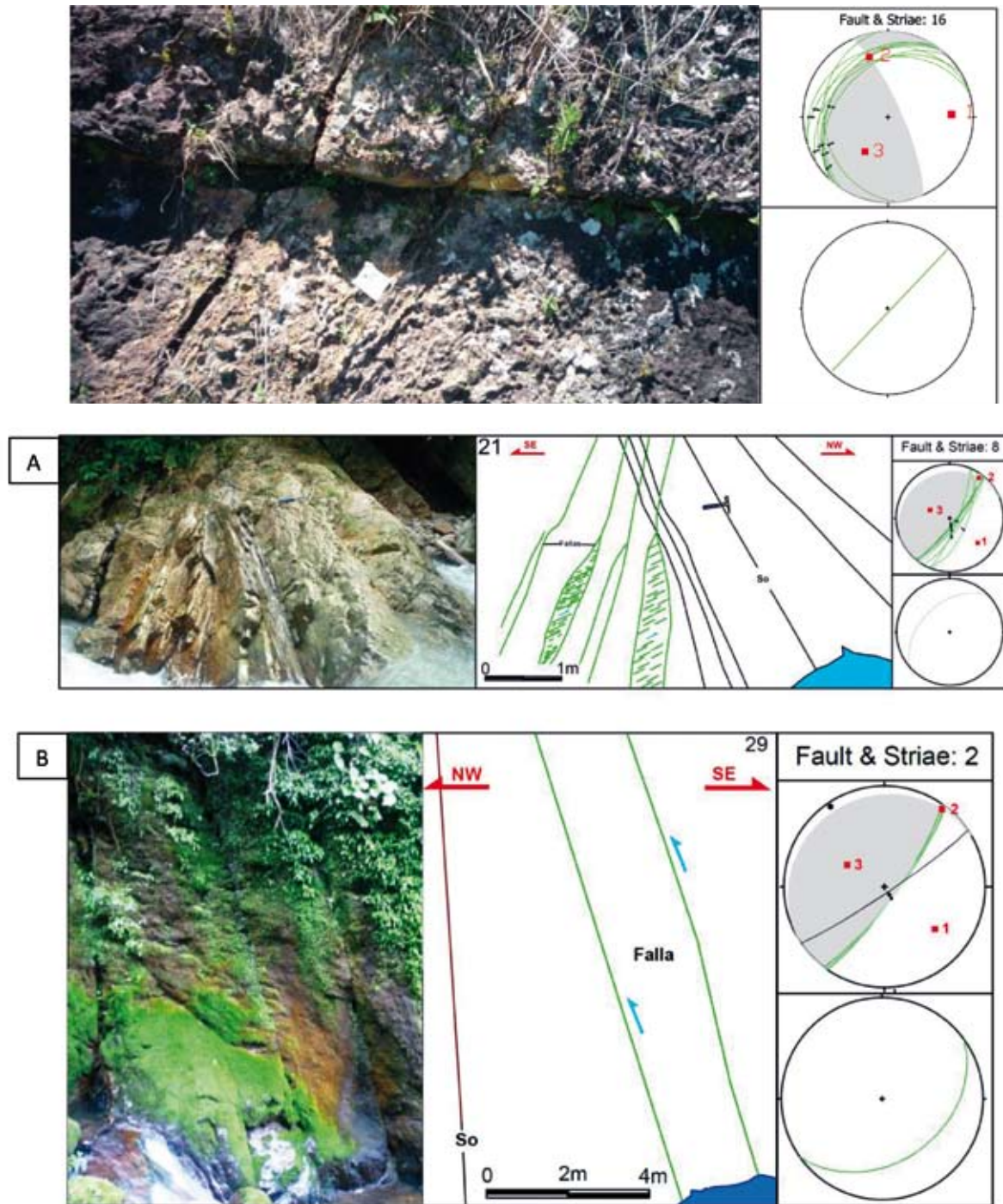
ANEXOS



Anexo 1. Análisis a diferentes escalas de un pavimento en la Formación Mirador, flanco trasero. Superior: Análisis a escala kilométrica de una imagen satelital, con fallas normales interpretadas en verde. Parte inferior: detalle del pavimento, mostrando las fallas normales acompañado de sets Eac y Dac además de la proyección estereográfica en estado deformado (izquierda) y rotado (derecha) y el estereograma de fallas y estrías con la solución de los esfuerzos. Para localización ver Figura 7, estación 15.

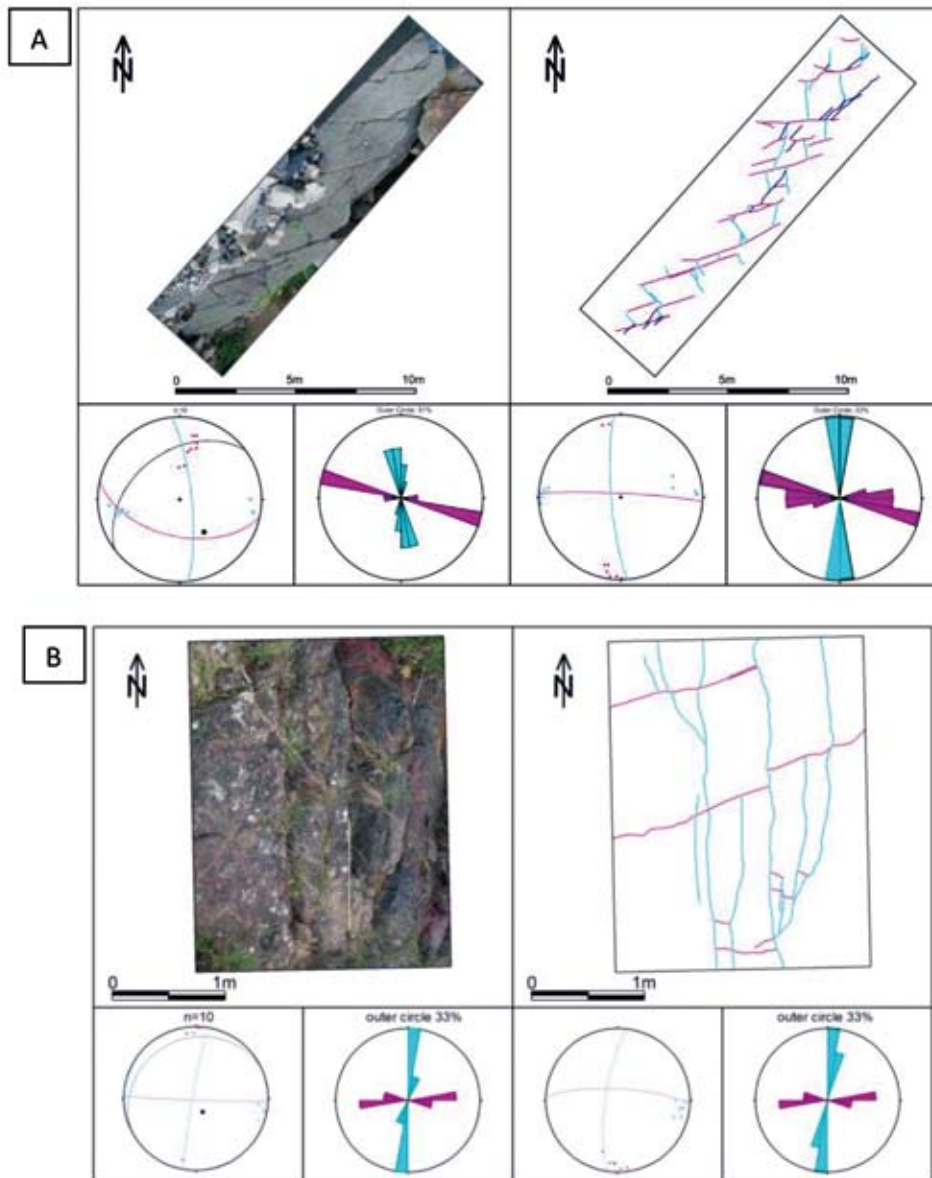
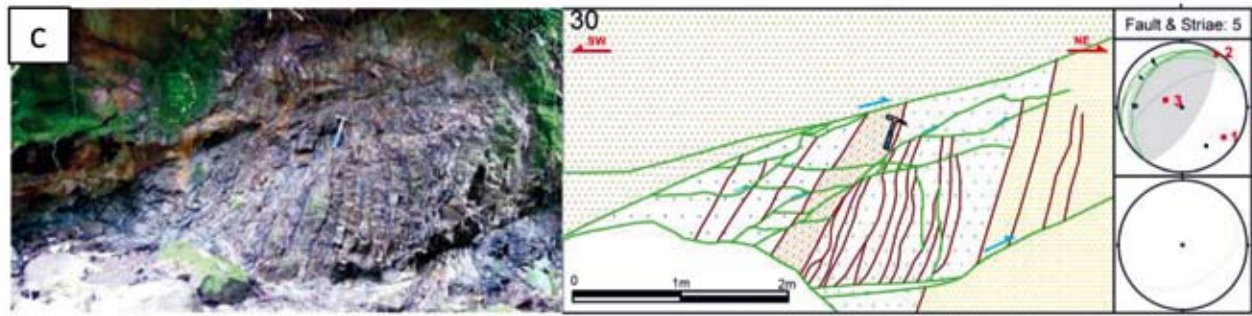


Anexo 2. Interpretación de las estructuras principales en una sección de corte a lo largo de la sección A-A', flanco frontal, Formación Cuervos. Parte inferior: proyección sobre el hemisferio inferior de las fallas inversas en verde y las fallas normales en rojo. Para localización ver Figura 8, estación 17.

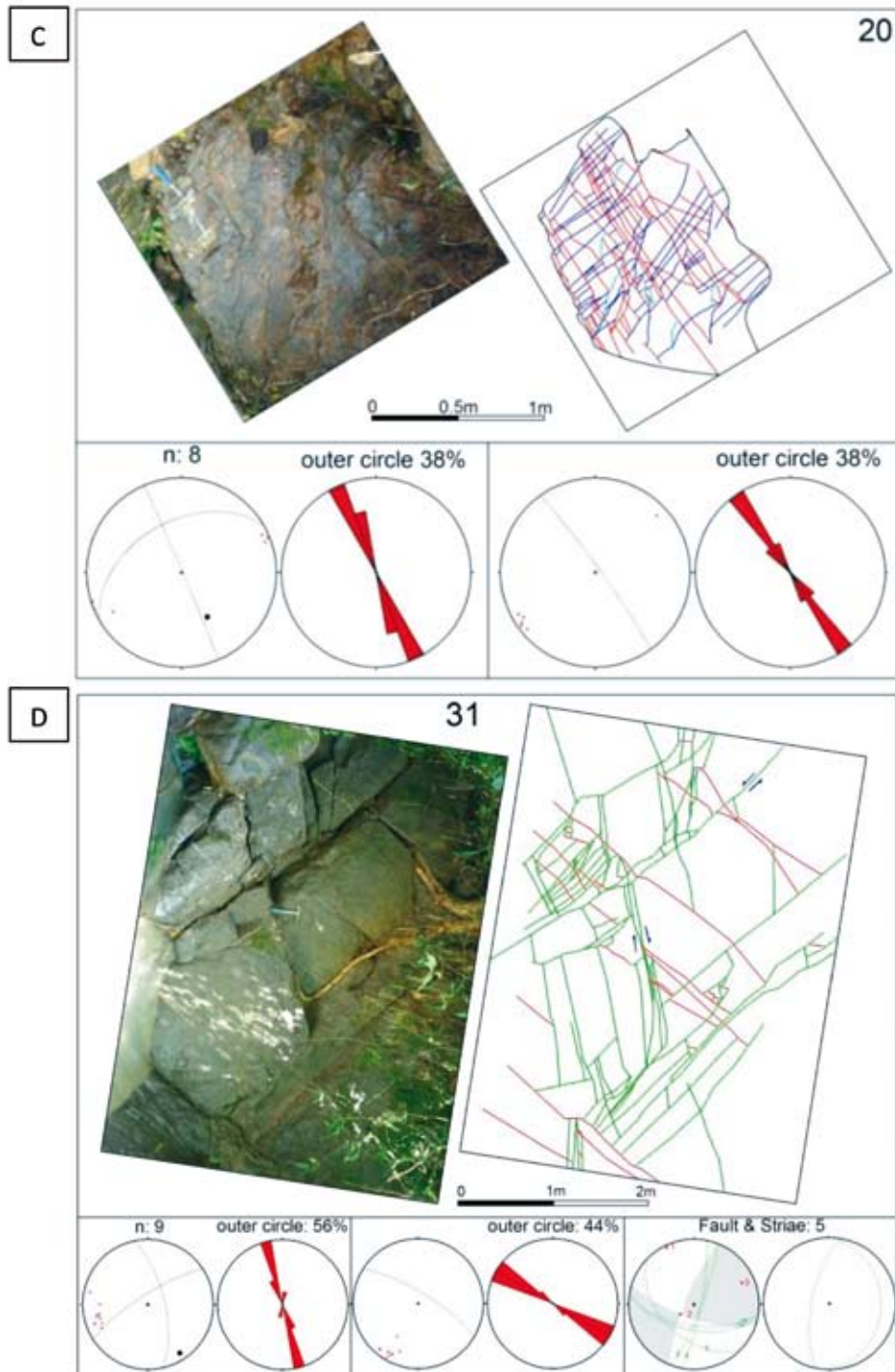


Anexo 3. Pavimento en el flanco frontal, sobre la Formación Mirador. Superior: pavimento mostrando el set Dab reactivado como fallas inversas destrales (color verde) y acompañado de los sets Eac y Eab y una proyección estereográfica de las diaclasas en estado deformado y rotado respectivamente. Inferior: detalle de las fallas con una proyección estereográfica que muestra los cuadrantes P-T y solución de los esfuerzos, además del plano promedio de las fallas rotadas con la estratificación, note la semejanza con un set Dab. Ver localización en la Figura 8 como estación 9.

A



Anexo 4. Secciones de corte con fallas inversas que afectan el flanco frontal. Al lado derecho hay una proyección estereográfica en estado deformado de las fallas estriadas con los cuadrantes de presión-tensión y la solución de los esfuerzos. En la parte inferior se muestra el set promedio de las fallas en estado rotado. A, Formación Mirador, B y C Formación Une.



Anexo 5. A) Pavimento en el flanco trasero sobre la Formación Carbonera. Parte inferior: proyección estereográfica en estado deformado (izquierda) y en estado rotado (derecha). Ver localización en la Figura 8, estación 4. B) Pavimento en el cierre sobre la Formación Mirador. Ver localización en la Figura 8, estación 8. C). Pavimento del flanco frontal en la Formación Cuervos. Ver localización en la Figura 8, estación 20. D). Pavimento en la Formación Fómeque. En rojo se muestra el set de venas fibrosas de calcita, afectado por fallas de rumbo (color verde). Para localización ver Figura 8, estación 31. En la parte más inferior de D aparecen las fallas en estado deformado y rotado respectivamente.

REFERENCIAS

- Allmendiger, R. (2003): Stereonet 1.2.0 y FaultKin 1.2.2 www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/RWA_programs.html. (Último acceso 10/11/2010).
- Bahat, D. & Engelder, T. (1984): Surface Morphology of Joints of the Appalachian Plateau, New York and Pennsylvania. *Tectonophysics*, 104(3–4): 299–313, doi:10.1016/0040-1951(84)90128-8.
- Behzadi, H., Dubey, A.K. (1980): Variation of interlayer slip in space and time during flexural folding. *Journal of Structural Geology*, 2: 453±457.
- Bellahsen, N., Fiore, P., Pollard, D.D. (2006): The role of fractures in the structural interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming. *Journal of Structural Geology*, 28: 850–867, doi:10.1016/j.jsg.2006.01.013.
- Bergbauer, E. & Pollard, D. (2004): A new conceptual fold-fracture model including prefolding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 294–307, doi:10.1130/B25225.1.
- Bons, P. (2000): The formation of veins and their microstructures, Epsilon Earth Processes Simulation Laboratory, Department of Earth Sciences, Monash University, Clayton (Melbourne), VIC 3168, Australia, www.virtualexplorer.com.au/special/meansvolume/tableofcontents.html, (último acceso 11/10/2010).
- Castellanos, J. (2009): Patrones de fracturamiento en el Anticlinal de Silbadero y su relación con el plegamiento en el frente de deformación del bloque colgante de la Falla de Guaicaramo (Tesis de pregrado). 30 p. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- Dengo, C.A. & Covey, M.C. (1993): Structure of the eastern Cordillera of Colombia: for trap Styles and regional tectonics. *American Association of Petroleum Geologists*, 77(8): 1315–1337.
- Engelder, T. & Peacock, D. (2000): Joint development normal to regional compression during flexural-flow folding: the Lillstock buttress anticline, Somerset, England. *Journal of Structural Geology*, 23(2-3): 259–277, doi:10.1016/S0191-8141(00)00095-X.
- Fischer, M.P. & Jackson, P. (1999): Stratigraphic controls on deformation patterns in fault-related folds: A detachment fold example from the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico. *Journal of Structural Geology*, 21, 613–633, doi:10.1016/S0191-8141(99)00044-9.
- Mora, A. (2007): Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia (Disertación Doctoral). 146 p. University of Postdam, Germany.
- Mora, A., Horton, B., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, R., Parra, M., Blanco, V., García, D. Stockli, D. (2011): Cenozoic deformation migration in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for hydrocarbon systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 94(10): 1543–1480, DOI: 10.1306/01051009111.
- Montaña, J. (2009): Distribución de patrones de fracturamiento en unidades reservorio del Anticlinal de Tierranegra y su relación con el plegamiento. Piedemonte Llanero de la Cordillera Oriental (Tesis de pregrado). 30 p. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- Nickelson, P., Hough, V. (1967): Jointing in the Appalachian Plateau of Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin*, 78: 609p.
- Pollard, D.D. & Aydin, A. (1988): Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100(8): 1181–1204, doi: 10.1130/0016-7606(1988)100<1181:piujot>2.3.CO;2.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1983): *The Techniques of Modern Structural Geology*, vol. 1 Strain Analysis. pp. 289, Academic Press, London.
- Reches, Z. (1976): Analysis of joints in two monoclines in Israel. *Geological Society of America Bulletin*, 87: 1654–1662.
- Robles, W., Buitrago, J., Kammer, A., Marentes, M. & Caro, M. (2007): Estimación de parámetros estadísticos para sistemas de fracturamiento, caso aplicado a la terminación periclinal del

Anticlinal de Arcabuco en el sector de Villa De Leyva. XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga.

- Rohrbaugh, M, Jr., Dunne, W. & Mauldon, M. (2002): Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. AAPG Bulletin, 86(12):2089-2104, doi:10.1306/61EEDE0E-173E-11D7-8645000102C1865D.
- Salvini, F. & Storti, F. (2001): The distribution of deformation in parallel fault related folds with migrating axial surfaces: comparison between fault propagation and fault-bend folding. Journal of Structural Geology, 23(1): 25–32.
- Salvini, F. & Storti, F. (2004): Active-hinge-folding-related deformation and its role in hydrocarbon exploration and development—Insights from HCA modeling, in K. R. McClay, ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems. AAPG, Memoir 82: 453– 472.
- Sanz, P., Pollard, D., Allwardt, P., Borja, R. (2008): Mechanical models of fracture reactivation and slip on bedding surfaces during folding of the asymmetric anticline at Sheep Mountain, Wyoming. Journal of Structural Geology, 30: 1177-1191, doi:10.1016/j.jsg.2008.06.002.
- Stearns, D.W. (1968): Certain aspects of fractures in naturally deformed rocks, in Riecker, R.E., ed., Rock mechanics seminar: Bedford, Terrestrial Sciences Laboratory, pp. 97–118.