



Resultados Paleomagnéticos en unidades del Paleógeno de Colombia y oeste de Venezuela, y posibles usos para la caracterización de contactos discordantes

Paleomagnetic results of Paleogene rocks in Colombia and western Venezuela, and possible characterization of unconformity contacts

GERMÁN BAYONA^{1,2}

CARLOS JARAMILLO²

ANDRÉS REYES-HARKER³

¹Corporación Geológica ARES, Calle 57 N. 23-09 Of. 202, Bogotá, Colombia

E-mail: gbayona@cgares.org, bayonag@si.edu

²Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, Ancon, Panama

E-mail: jaramillo@si.edu

³Instituto Colombiano del Petróleo-ECOPETROL, Km. 7 vía a Piedecuesta

E-mail: areyes@ecopetrol.com.co

BAYONA, G.; JARAMILLO, C. & REYES-HARKER, A. (2006): Resultados Paleomagnéticos en unidades del Paleógeno de Colombia y oeste de Venezuela, y posibles usos para la caracterización de contactos discordantes.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 31, pp. 57-72, 8 Figs., Bogotá.

RESUMEN

Análisis de paleomagnetismo en diferentes unidades del Cretácico más superior y Paleógeno en tres secciones ubicadas en Río Loro (Andes de Mérida, Venezuela), La Guajira (mina del Cerrejón, Colombia) y Cosgua (Cordillera Oriental de Colombia) indican eventos de remagnetización que dificultan aislar el componente primario de magnetización. A pesar de las bajas intensidades de magnetización y la generación de óxidos a temperaturas >350°C, dos probables componentes de magnetización fueron aislados utilizando métodos de desmagnetización termal y campos alternos. El componente A fue aislado en la mayoría de las unidades estudiadas con temperaturas de desbloqueo/coercividades que varían con la litología. En las tres secciones, la dirección media sin corrección por buzamiento de la componente A es estadísticamente idéntica con declinación al norte e inclinaciones positivas de moderado a bajo ángulo. La dispersión de las direcciones aumenta considerablemente al hacer la corrección por buzamiento, sugiriendo un evento de remagnetización post-deformación. Este componente fue aislado principalmente en intervalos arenosos o en estratos limitados por discordancias tipo paraconformidad y disconformidad. De igual manera, la Magnetización Remanente Natural aumenta considerablemente en estos contactos, sugiriendo un control estratigráfico en la migración de fluidos orogénicos. El componente B fue aislado en pocos especímenes de la Formación Catatumbo en Río Loro y en las tres unidades estudiadas en La Guajira. Después de la corrección por buzamiento, las direcciones del componente B se agrupan en dos direcciones, una normal y otra inversa, siguiendo una distribución no Fisheriana. Los resultados del componente B no son estadísticamente significativos para determinar si este componente corresponde a un evento de remagnetización o es primario. En futuros estudios de magnetoestratigrafía se recomienda incluir análisis de la mineralogía magnética y aumentar la cantidad de muestreo por sitio (al menos 10 muestras por sitio), enfocando principalmente en unidades lodosas o en intercalaciones arena-lodo y alejado de los contactos discordantes. Para la caracterización de contactos se recomienda un muestreo cada metro en las unidades infrayacentes y suprayacentes al contacto.

Palabras Clave: Andes de Mérida, Colombia, Magnetoestratigrafía, Paleoceno, Paleomagnetismo.

ABSTRACT

The results of a paleomagnetic analysis carried out in the uppermost Cretaceous and Paleogene strata exposed in Río Loro (Andes de Mérida, Venezuela), La Guajira (Cerrejón coal mine, Colombia) and Cosgua (Eastern Cordillera of Colombia) indicate remagnetization events that obscure the isolation of the primary component of magnetization. Two components of magnetization were isolated

using thermal and alternating field demagnetization procedures, despite the low magnetization intensity of samples and oxidation during heating. In most of the studied units, one component was isolated, named A, at low unblocking temperatures/coercivities. In situ directions of component A are identical in the three sections with northward declinations and low to moderate positive inclinations. Tilt-correction tests indicate a post-tilting remagnetizing event. The Natural Remanent Magnetization increases abruptly across unconformities suggesting migration of orogenic fluids along these contacts. The other component, named B, was poorly isolated in one unit in the Rio Loro section and in the three units in the Guajira section. Tilt-corrected directions of the component B are grouped into two directions, one northward with positive inclinations and the other southward with negative inclinations. These directions have neither a Fisherian distribution nor significant field test results, precluding any interpretation of their origin. Future studies need to test this component, but sampling must include at least 10 specimens per site in muddy and fine-grained lithologies in beds some meters apart from regional unconformities. In order to characterize regional unconformities using magnetic mineralogy techniques, it is recommended a meter-scale sampling above and below the unconformity.

Key words: *Andes de Mérida, Colombia, Magnetostratigraphy, Paleocene, Paleomagnetism.*

INTRODUCCION

Esta investigación hace parte de un esfuerzo para mejorar el marco cronoestratigráfico del Paleógeno en el noroeste de Suramérica. Este marco es útil para entender los cambios paleoclimáticos y paleobiológicos registrados en el trópico durante el Paleógeno (e.g., patrones de paleodiversidad, JARAMILLO *et al.* 2006), y la distribución de rocas de interés económico en el norte de los Andes. En el Paleoceno-Eoceno ocurrieron cambios en la circulación global del océano (KENNETT & STOTT 1991), un calentamiento global marcado (ZACHOS *et al.* 1993), y un incremento acelerado de la tasa de evolución biológica (WING *et al.* 1995); la necesidad de obtener información sobre este intervalo de tiempo en zonas tropicales ha sido reconocida por varios autores (SLOAN & MORRILL 1998). El Paleógeno en Colombia y Venezuela incluye unidades de alto interés económico, debido a la abundante presencia de espesos mantos de carbón así como por la distribución de excelentes unidades reservorio en la Cordillera Oriental de Colombia, Andes de Mérida y cuencas adyacentes a estos cinturones orogénicos.

Un gran inconveniente de las unidades asignadas al Paleógeno en el norte de los Andes es la dificultad de correlacionar sistemas locales de datación, basados en polen y esporas, con la escala de tiempo internacional, la cual no utiliza polen y esporas (BERGGREN *et al.* 1995, GRADSTEIN *et al.* 2005). La edad de las unidades del Paleógeno en Colombia y Oeste de Venezuela han sido calibradas con palinomorfos (BAYONA *et al.* 2004, GERMERAAD *et al.* 1968, JARAMILLO 2001, JARAMILLO *et al.* 2002, JARAMILLO *et al.* 2006, PARDO *et al.* 2003, VAN DER HAMMEN 1954) y dinoflagelados (YEPES 2001); sin embargo, la asociación de polen aún no puede considerarse como una herramienta cronoestratigráfica y necesita métodos independientes de calibración. Una secuencia de polaridad magnética amarrada a la distribución temporal de biozonas de palinomorfos puede mejorar la calibración temporal al correlacionar las biozonas del mismo intervalo de polaridad entre diversas secciones estratigráficas. Las secciones de Rio

Loro (Andes de Mérida, Venezuela), La Guajira (Mina del Cerrejón, Colombia), y Cosgua (Cordillera Oriental, Colombia) (Fig. 1) se seleccionaron en este estudio debido a su continua exposición y excelente recobro de palinomorfos (VAN DER KAARS 1983, PARDO 2004) y dinoflagelados (POCKNALL *et al.* 1997, YEPES 2001).

El objetivo de este estudio es determinar si es posible aislar el componente de magnetización primario, ya sea deposicional o diagenético temprano, y elaborar una secuencia de polaridad magnética. Esta técnica la utilizó JASON *et al.* (2000) para datar una trasgresión marina en estratos sin fósiles del Eoceno en Barinas (Venezuela). Este es el único reporte de magnetoestratigrafía para la zona de estudio; otros intentos en los Andes de Mérida y Serranía de Perijá (V. Costanzo-Alvarez, comunicación verbal, 2003) y Borde Llanero (M. Parra, comunicación verbal, 2004) no se han publicado debido a los pobres resultados. Un gran inconveniente para identificar el componente de magnetización primario en Sudamérica es la similitud entre la dirección del dipolo geocéntrico axial actual y las direcciones de magnetización aisladas en rocas post-Triásico de los Andes de Mérida (CASTILLO *et al.* 1991), Serranía de Perijá (GOSE *et al.* 2003, MAZE 1984), la Sierra Nevada de Santa Marta (MACDONALD & OPDYKE 1984), Cordillera Oriental de Colombia (AYALA-CALVO *et al.* 2005) y Valle Superior del Magdalena (BAYONA *et al.* 2005). Estos estudios indican que estos bloques ya estaban situados cerca al ecuador magnético (declinación al norte con moderada inclinación) y adjuntos al Cratón Sudamericano desde el Jurásico Tardío (BAYONA *et al.* en prensa). Una rotación a lo largo de ejes verticales en dirección horaria ($50^\circ \pm 12^\circ$) ha afectado bloques de la Serranía de Perijá (GOSE *et al.* 2003) pero no han afectado bloques de los Andes de Mérida (CASTILLO *et al.* 1991).

En términos generales, las unidades seleccionadas del Paleógeno en las tres secciones consisten en una sucesión siliciclástica que varía de shales y lodolitas a intercalaciones de areniscas con mantos de carbón y lodolitas (Fig. 2). En Rio Loro, un conjunto de secuencias grano-

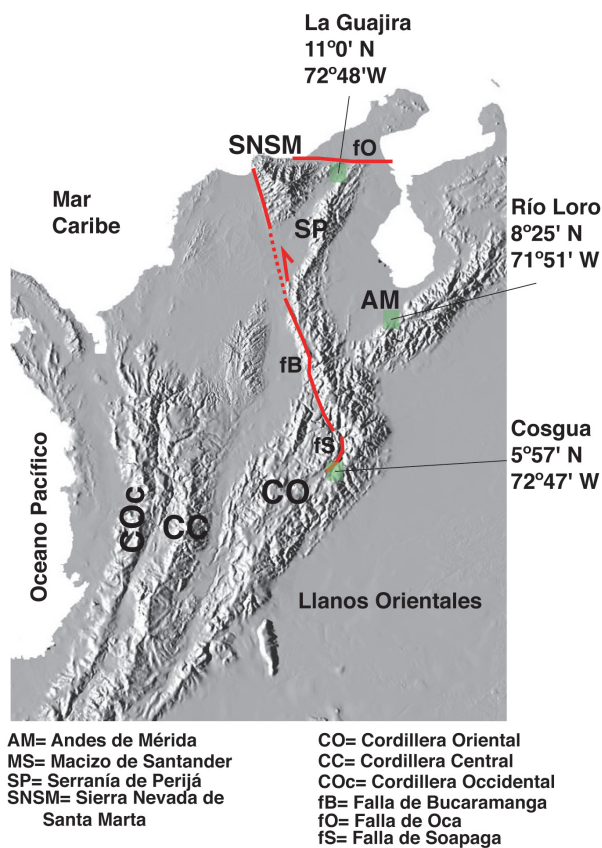


Fig. 1. Localización de las secciones Río Loro (Andes de Mérida, Venezuela), La Guajira (mina del Cerrejón, Colombia) y Cosgua (Cordillera Oriental de Colombia).

crecientes de lodolitas a areniscas sublífticas de las formaciones Mito Juan-Catatumbo (Maastrichtiano-Paleoceno) infrayacen en contacto disconforme a capas de cuarzoareniscas con estratificación cruzada de la Formación Mirador (Eoceno). En La Guajira, carbonatos y areniscas calcáreas de la Formación Hato Nuevo (Maastrichtiano) infrayacen la secuencia mixta de la Formación Manantial (Maastrichtiano-Paleoceno; ETAYO-SERNA 1979, HAUGHT *et al.* 1944); la anterior unidad grada a una secuencia de intercalaciones de areniscas inmaduras, lodolitas y carbón de la Formación Cerrejón (Paleoceno Superior; BAYONA *et al.* 2004). En Cosgua, areniscas cuarzosas de la Formación Socha Inferior (Paleoceno Inferior) gradan abruptamente a una sucesión predominantemente lodosa de la Formación Socha Superior (Paleoceno Superior-Eoceno Inferior; PARDO 2004). Esta última unidad infrayace en contacto disconforme a cuarzoareniscas de la Formación Picacho (Eoceno Inferior-Medio), las cuales gradan abruptamente a una sucesión predominantemente lodosa de la Formación Concentración (Eoceno Medio-Oligoceno medio; BAYONA *et al.* en revisión). Los ambientes de acumulación interpretados para estas unidades varían desde

ambientes marinos someros (e.g., base de la sección de la Guajira, ETAYO-SERNA 1979), ambientes marginales estuarinos (las tres secciones), y ambientes fluviales a costeros principalmente en unidades del Paleoceno Superior y Eoceno en Cosgua (CÉSPEDES & PEÑA 1995, PARDO 2004). La tendencia granocreciente en rocas siliciclásticas en las sucesiones sedimentarias del Maastrichtiano-Paleoceno de La Guajira y Río Loro ha sido interpretada como la progradación de sistemas costeros y fluviales sobre sistemas someros marinos (VILLAMIL 1999). Aunque shales negros, lodolitas oscuras y carbones no son litologías apropiadas para estudios de paleomagnetismo, el componente magnético primario ha sido aislado en secuencias carboníferas del Paleozoico superior en los Apalaches (NOLTIMIER 1983) y del Mioceno en Tailandia (BENAMMI *et al.* 2002).

Este artículo incluye los resultados de los componentes de magnetización aislados en muestras extraídas de las unidades Mito Juan-Catatumbo-Mirador en Río Loro, Hato Nuevo-Manantial-Cerrejón en la Guajira, y Socha Inferior-Socha Superior-Concentración en Cosgua. Los componentes de magnetización reportados en este informe están caracterizados por su dirección, estabilidad a diferentes temperaturas y/o coercividades, tiempo de magnetización con respecto al tiempo de plegamiento, y continuidad a lo largo de la sección estratigráfica. En el caso de no aislar el componente característico (posible componente primario), como ocurre en más del 90% de los especímenes analizados en este estudio, indicaremos el tiempo de remagnetización con respecto a eventos de deformación. Componentes de magnetización secundarias pueden documentar rotaciones de bloques y eventos de migración de fluidos (e.g., en los Apalaches, STAMATAKOS *et al.* 1996). En Río Loro examinamos la variación de la Magnetización Remanente Natural (MRN) a través de contactos discordantes para determinar la influencia de estos en los procesos de magnetización y si estudios de MRN ayudan a caracterizar contactos de este tipo.

GEOLÓGIA REGIONAL Y UBICACIÓN DE LOS SITIOS

En la sección de Río Loro, localizada en el flanco Noroeste de los Andes de Mérida (Fig.1), afloran las Formaciones Mito Juan, Catatumbo y Mirador buzando predominantemente al Nor-noroeste; localmente la sección es afectada por fallas inversas en niveles lodosos. El espesor estratigráfico del intervalo a estudiar es 328 m (YEPES 2001), y los especímenes colectados en 85 sitios (296 especímenes) están distribuidos aproximadamente cada 4 m estratigráficos en intervalos no cubiertos entre los últimos metros de la Formación Mito Juan hasta la Formación Mirador (Fig. 2). Este intervalo de 4 m es un estimado de la duración del mínimo crón de polaridad en el Paleoceno (CANDE & KENT 1995) (0.3 m.y.). En cada sitio se seleccionó la roca de grano más fino y las muestras (promedio de tres especímenes por sitio) fueron tomadas en un rango menor a 1 m estratigráfico. En niveles con concreciones ferruginosas se tomaron muestras tanto en las concreciones como en las capas adyacentes. Para de-

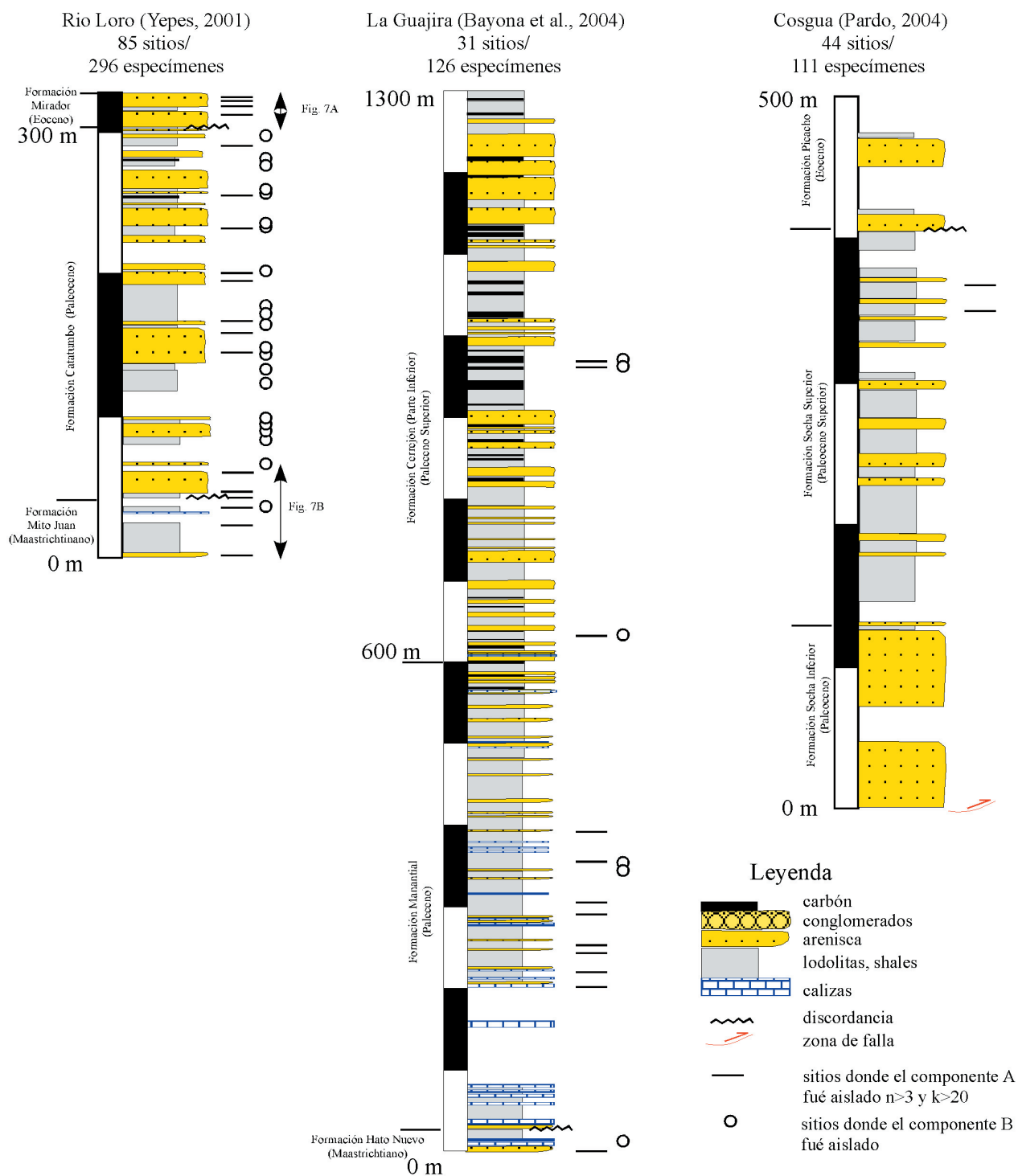


Fig. 2. Columnas estratigráficas esquemáticas de las secciones donde se realizó el muestreo. Ver figura 1 para localización de secciones y texto para criterios en la selección de sitios. Símbolos a la derecha de cada columna representa la posición estratigráfica de los sitios donde se aisló los componentes de magnetización A y B que se discuten en el texto.

finir el tiempo de magnetización de los componentes con respecto a la deformación (prueba de pliegue), 5 sitios (22 especímenes) fueron colectados en capas buzando al sureste por la antigua carretera El Vigía-Mérida en rocas de la Formación Catatumbo.

En la sección de La Guajira, ubicada en la mina del Cerrejón, se trabajaron las Formaciones Hato Nuevo, Manantial y Cerrejón. La mina limita al norte con la Falla de Oca, al oeste con las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta y al este con el sistema de fallas del borde occidental de la Serranía de Perijá (UJUETA & LLINÁS 1990) (Fig. 1). En la mina afloran unidades del Cretácico Superior al Eoceno (?) en una secuencia buzando regionalmente al sureste (BAYONA *et al.* 2004). Fallas de rumbo, cabalgamiento y pliegues afectan localmente estratos en la mina. Diez y ocho sitios (59 especímenes) fueron inicialmente distribuidos en diferentes niveles estratigráficos en las Formaciones Hato Nuevo, Manantial y Cerrejón, y en ambos flancos de dos pliegues. A partir de los resultados paleomagnéticos preliminares, se decidió concentrar una segunda fase de muestreo en el tope de la Formación Hato Nuevo, en la Formación Manantial y en la parte inferior de la Formación Cerrejón (13 sitios/48 especímenes) (Fig. 2) para corroborar la presencia de dos componentes de magnetización en ese intervalo estratigráfico.

La sección de Cosgua está situada en el bloque ya-ciente de la Falla de Soapaga y sobre la vía férrea Sogamoso-Paz de Río (Fig. 1). Un total de 44 sitios (111 especímenes) fueron colectados a lo largo de los 500 m de sección que expone las formaciones Socha Inferior, Socha Superior y Picacho en el flanco Este de un sinclinal. En un anticlinal al sur de la sección se tomaron 4 sitios (15 especímenes) ubicados cerca al tope de la Formación Socha Superior y en la base de la Formación Concentración. El trazo del eje axial de los pliegues mencionados es paralelo al trazo de la Falla de Soapaga, evitando así posibles complicaciones por rotación de estructuras a lo largo de ejes verticales.

Varios eventos de deformación que afectan las unidades del Cretácico cúspidal-Paleógeno han sido propuestos para el sector norte de Suramérica. Aunque no hay consenso en el marco tectono-eustático-climático y paleogeografía para el Paleoceno, varios autores proponen el levantamiento de la paleo-Cordillera Central a finales del Cretácico (GÓMEZ *et al.* 2005, VILLAMIL 1999) y de la Sierra Nevada de Santa Marta desde el Paleoceno (MONTES *et al.* 2005) con migración de los sistemas fluviales desde la paleo-cordillera hasta la posición actual del lago de Maracaibo (VAN ANDEL 1958, VILLAMIL 1999). Sin embargo, hay estudios que evidencian levantamiento de la parte axial de la Cordillera Oriental desde el Maastrichtiano-Paleoceno (CORTÉS *et al.* 2006), Paleoceno (SARMIENTO-ROJAS 2001), y Oligoceno (GÓMEZ *et al.* 2005, TORO *et al.* 2004). La Orogenia Andina de edad Mioceno-Plioceno da la configuración actual a la Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de Perijá, los Andes de Mérida y

Cordillera Oriental de Colombia (COOPER *et al.* 1995, CHIGNE & ROJAS 1997) (Fig. 1). La precipitación de minerales ferromagnéticos por migración de fluidos está posiblemente asociado a pulsos de deformación (OLIVER 1986), y en varios casos pueden borrar el componente primario de magnetización (STAMATAKOS *et al.* 1996).

METODOLOGIA

Los núcleos extraídos en campo con un taladro portátil ó de muestras de mano orientadas en el laboratorio fueron cortados al tamaño estándar de 2.2 cm de alto por 2.54 cm de diámetro. A los especímenes de la sección de Cosgua solo se aplicó desmagnetización progresiva termal hasta 400°C; debido a la inestabilidad del comportamiento de la magnetización remanente, sólo se prosiguió con 17 muestras a temperaturas entre 525 y 680°C. Especímenes representativos por sitios y/o litologías en Río Loro y Cerrejón se seleccionaron para una fase piloto de desmagnetización progresiva termal (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 380, 400, 430 y 460°C) y de campo alterno (4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 mT). La susceptibilidad fue medida después de cada paso de desmagnetización térmica para controlar la generación de nuevos óxidos durante el calentamiento.

El proceso de desmagnetización del restante grupo de muestras de Río Loro y Cerrejón fue establecido de acuerdo a los resultados de las muestras piloto. Las direcciones en el proceso de lavado por el método termal fueron más erráticas que por campo alterno. Por este motivo, el método de campo alterno prevaleció y se aplicó un mínimo de 10 pasos hasta 60 mT. Dependiendo de la variación de intensidad y comportamiento de las direcciones, se procedió a continuar la desmagnetización por campo alterno hasta 90–130 mT. Se aplicó el método termal cuando las muestras piloto indicaban una mejor discriminación de los componentes, o cuando las intensidades no bajaban del 50% por campo alterno. Los especímenes de Río Loro se calentaron en pasos progresivos entre 100 y 300°C, mientras que a los especímenes de la Guajira y Cosgua se calentaron progresivamente entre 100 y 670°C.

La medición de la intensidad y la dirección de la magnetización remanente se realizó con un magnetómetro Criogénico 2G DC en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Buenos Aires, Argentina (secciones de Río Loro y La Guajira) y en el Laboratorio de la Universidad de Florida (sección de Cosgua). El calentamiento de las muestras se realizó en un horno ASC TD-48 y la desmagnetización de campo alterno se realizó en un degausser estático de tres ejes incorporado al criogénico. La susceptibilidad en las muestras fue monitoreada con un susceptómetro Bartington MS2.

Los componentes de magnetización fueron calculados con análisis de componentes principales (KIRSHVINK 1981) y la ayuda de diagramas ortogonales (ZIJDERVELD 1967). Cada componente fue definido con al menos tres pasos de

desmagnetización consecutivos y cuya desviación máxima angular (MAD) < 15°. La dirección media por sitio fue establecida con un mínimo de tres especímenes por sitio (n=3) utilizando la estadística de Fisher (FISHER 1953). En especímenes con sobreimposición de componentes se utilizó el método de círculos mayores. La comparación de las direcciones media antes y después de la corrección por buzamiento se presentan en proyecciones estereográficas, y son suficientes para corroborar el tiempo de magnetización con respecto a la deformación de la orogenia Andina post-Miocena. Aunque la prueba de pliegue (McELHINNY 1964) fue realizada en cada sección (ver detalles en BAYONA 2003 para Río Loro y La Guajira), el bajo número de sitios utilizados para éste ejercicio no ofrece resultados estadísticamente significativos.

RESULTADOS

Los especímenes analizados presentan valores extremadamente bajos de intensidades (por debajo de 10-6 A/m) y el comportamiento magnético es variado debido al amplio rango de litologías analizadas. El decaimiento de la intensidad normalizada del MRN es muy variable (Fig. 3), inclusive en el mismo sitio, y en menos del 30% de los especímenes se logró reducir a menos del 20% la intensidad del MRN. Es común el comportamiento errático de las direcciones por debajo del 30% de la intensidad del MRN. En pocos especímenes se logra diferenciar dos componentes de magnetización (e.g., Fig. 3A) y en la mayoría de los casos los componentes aislados no decaen al origen sugiriendo la presencia de un componente sin resolver (e.g., Fig. 3B). En varios especímenes el espectro de la temperatura de desbloqueo/coercividad de los componentes se sobrepone, procediendo a determinar el segundo componente por círculos mayores.

La mayoría de los componentes aislados no sobrepasan la temperatura de desbloqueo de 360 °C o coercividades hasta 60 mT. Una de las razones es el cambio composicional de los especímenes (e.g., oxidación de sulfuro de hierro) al someterlas a temperaturas > 350°C (BAYONA 2003). Debido a las bajas intensidades de magnetización, imposibilidad de aislar los componentes a temperaturas > 350°C, y a la posible sobreimposición de espectros de desbloqueo, los componentes aislados se agruparon tomando como criterio dominante la dirección en vez de la temperatura de desbloqueo/coercividad del componente.

Las direcciones aisladas por espécimen se han clasificado en dos componentes. La temperatura de desbloqueo/coercividades de estos dos componentes es similar en el mismo sitio, pero difieren entre sitios y secciones. El componente A tiene una dirección consistente con la dirección presente del dipolo geocéntrico axial (norte con inclinación moderada). El componente B presenta direcciones similares al componente A después de realizar la corrección por buzamiento. Los componentes aislados que no cumplen con los criterios establecidos para A y B, se agruparon como parte de un grupo de direcciones, de-

nominado C. En los siguientes párrafos discutimos cada una de estos componentes por sección.

COMPONENTES DE MAGNETIZACION EN RÍO LORO

El componente A fue aislado en 18 sitios con un número de especímenes $n > 3$ y con un parámetro de precisión $k > 20$, ubicados principalmente en intervalos arenosos de las formaciones Mito Juan (3 sitios en capas buzando al NNW), Catatumbo (10 sitios en capas buzando al NNW y 2 sitios en capas buzando al SSE) y en la Formación Mirador (3 sitios en capas buzando al NNW) (Fig. 2). En la Formación Catatumbo, el componente A es aislado a temperaturas de desbloqueo entre 150-330°C o coercividades que varían entre 15-65 mT (Fig. 3A y B). La dirección del componente A en la Formación Mirador es aislada en algunos sitios a coercividades entre 60 y 90 mT (Fig. 3C). La dirección media del componente A ($D=359.3$ $I=28.1$ $k=22.8$ $a_{95}=7.4$) es calculada usando la media de estos 18 sitios. Al realizar la corrección por buzamiento de las direcciones medias se observa un incremento de la dispersión ($k=7$); por consiguiente, el componente A corresponde a un evento post-plegamiento (Fig. 4A). Esta interpretación es corroborada por la prueba de conglomerados (BAYONA 2003) y la similitud de las direcciones en sitios infrayaciendo y suprayaciendo la discordancia (Fig. 4A). Direcciones al sur y con inclinación negativa moderada son registradas en 4 de los 296 especímenes analizados.

El componente B se aisló en 33 especímenes de la Formación Catatumbo, principalmente en intervalos lodosos (Fig. 2). Este componente B es aislado a mayores temperaturas/coercividades del componente A en 11 especímenes (Fig. 3A) y en 2 especímenes es aislado a mayores coercividades del componente C. El componente B es el único componente aislado en 22 especímenes entre 200-300°C/10-25 mT. El análisis estadístico del componente B se realiza a nivel de espécimen. Las direcciones del componente B antes de la corrección por buzamiento es aleatoria (Fig. 4B). Después de la corrección por buzamiento, las direcciones del componente B se agrupan en dos direcciones (Fig. 4B). Una dirección normal (media de $n=26$, $D=341.1$ $I=18.9$ $k=6.02$ $a_{95}=12.6$), cuya inclinación se asemeja a la del componente A, y otra dirección inversa (media de $n=7$, $D=197$ $I=-35.7$ $k=4.74$ $a_{95}=31$).

Las direcciones en el grupo C corresponden a 20 especímenes de la Formación Catatumbo y en ningún sitio se pudo calcular la media. Las declinaciones antes y después de la corrección por buzamiento se mantienen principalmente hacia el este y oeste, pero sus inclinaciones son muy variables (BAYONA 2003).

COMPONENTES DE MAGNETIZACION EN LA GUAJIRA

El componente A fue aislado en 8 sitios con un número de especímenes $n > 3$ y $k > 20$ (Tabla 1), localizados principalmente en la Formación Manantial y en capas buzando al sureste. El componente A se aisló a temperaturas entre

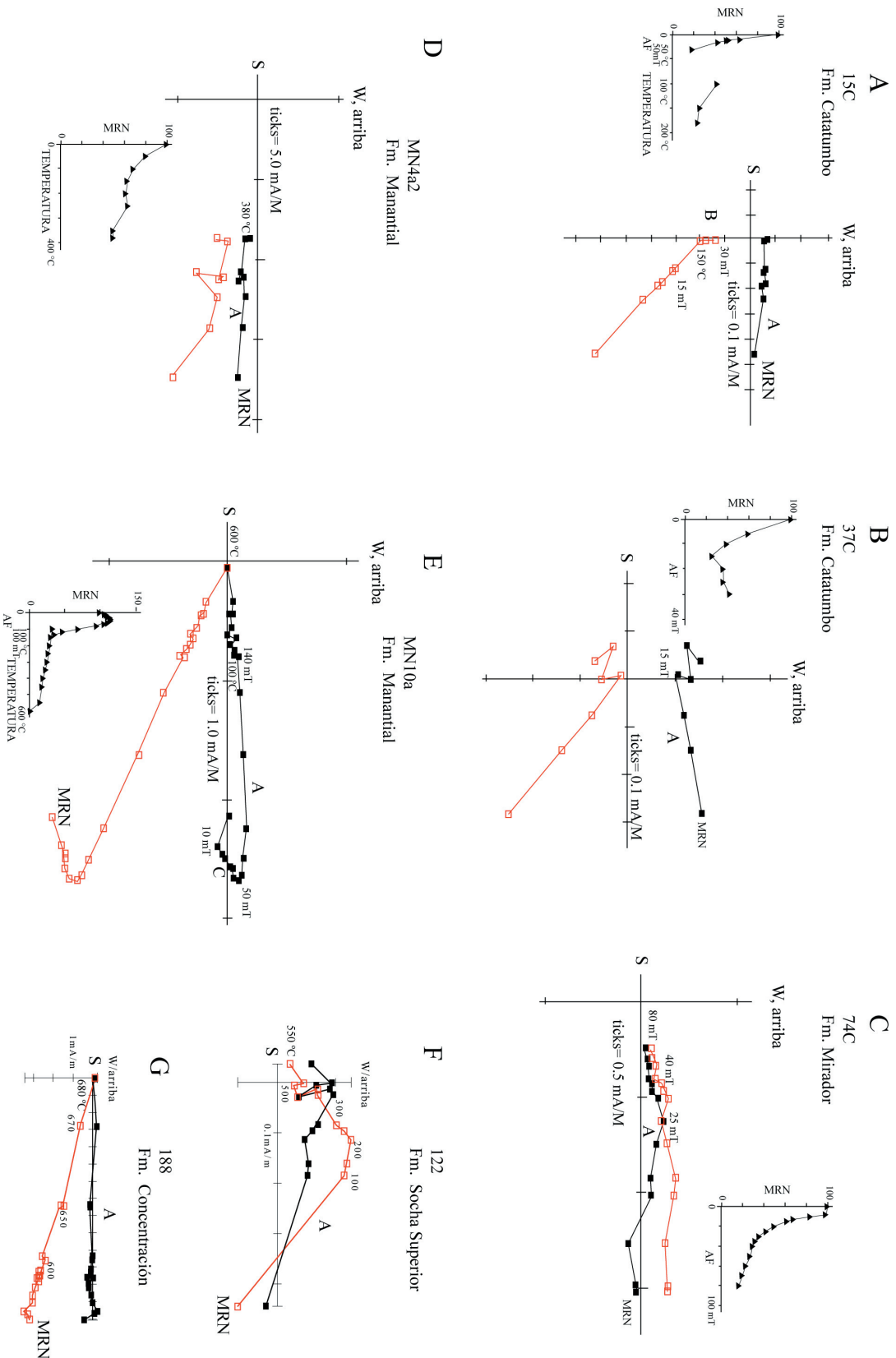


Fig. 3. Diagramas ortogonales [símbolos relleno (abierto) en plano horizontal (vertical)] y decaimiento normalizado de la intensidad de la Magnetización Remanente Natural (MRN) en especímenes de la sección de Río Loro (diagramas A a C), La Guajira (diagramas D y E) y Cosguá (diagramas F y G). En algunos especímenes se aislaron los componentes A y B a bajas temperaturas o coercividades (diagramas A, B, C, D y F). Estos componentes se aislaron con menos frecuencia a temperaturas intermedias a altas (diagramas E y G)/moderadas coercividades (diagrama C). Componentes de magnetización no fueron removidos en varios especímenes por su inestabilidad a moderadas coercividades/temperaturas (diagramas A, B, D y F).

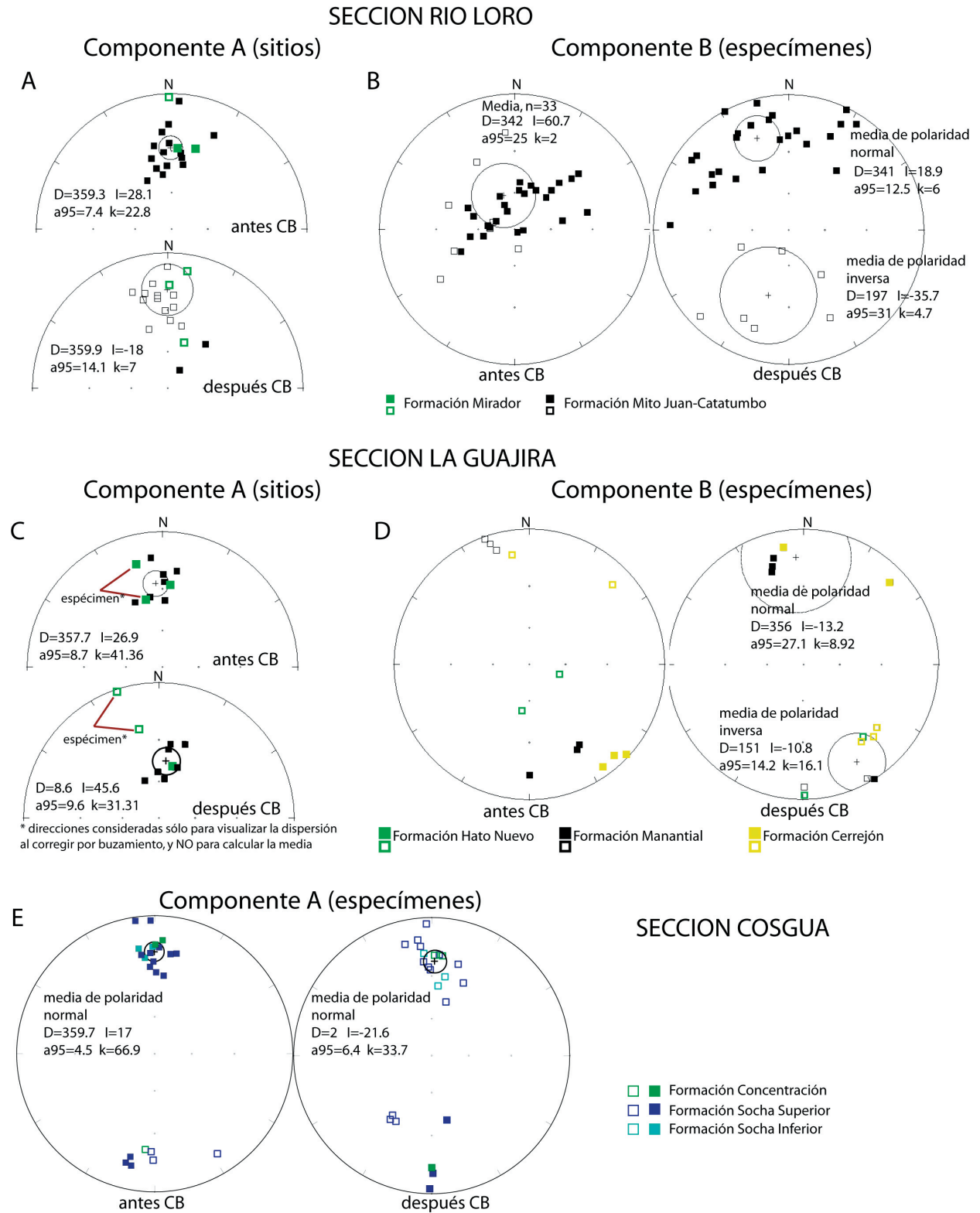


Fig. 4. Estereogramas de igual área [cuadrado relleno (abierto) indica inclinaciones hacia abajo (arriba)] de los componentes A y B en las tres secciones. Note que el tratamiento estadístico difiere para el cálculo de la dirección media por sección y por componente. CB= Corrección por buzamiento.

250-350°C o coercividades menores de 30 mT en las formaciones Hato Nuevo y Cerrejón (Fig. 3D). Este mismo componente es aislado hasta 650°C y coercividades hasta 130 mT en algunos sitios de la Formación Manantial (Fig. 3E). La dirección media del componente A ($D=357.7$ $I=26.9$ $k=41.3$ $a95=8.7$) se calculó utilizando las direcciones medias de los 8 sitios en capas buzando al sureste.

Después de hacer la corrección por buzamiento, la dispersión de las direcciones incrementa ($k=34.3$). En la Figura 4C se presentan las direcciones de dos especímenes en sitios ubicados en el otro flanco con fines de ilustrar esta dispersión. Estos resultados indican que el componente A corresponde a un evento post-plegamiento (Fig. 4C). Esta interpretación es corroborada por la similitud de las direcciones en sitios infrayaciendo y suprayaciendo el contacto entre las formaciones Hato Nuevo y Manantial. Direcciones al sur y con inclinación negativa moderada son registradas en 2 especímenes de la Formación Manantial.

El componente B se aisló en 13 especímenes de las tres unidades. Este componente es aislado a más bajas coercividades (15-25 mT) que el componente A en 9 especímenes de las formaciones Manantial y Cerrejón. El componente B en los restantes 4 especímenes fue el único componente aislado entre 200 y 400°C. El análisis estadístico de este componente a nivel de espécimen indica el agrupamiento en dos direcciones después de la corrección por buzamiento (Fig. 4D). Una dirección normal ($D=356$ $I=13.2$ $k=8.9$ $a95=27.1$) que se asemeja a la del componente A y otra inversa ($D=151$ $I=-10.8$ $k=16.1$ $a95=14.2$).

Las direcciones en el grupo C corresponden a 21 especímenes. Las direcciones agrupadas en el componente C tiene una temperatura de desbloqueo entre 200-400°C, o se aíslan a coercividades entre 20 y 50 mT. El componente C es aislado a más bajas temperaturas/coercividades que el componente B en dos sitios de la Formación Manantial. Las direcciones antes y después de la corrección por buzamiento son muy variables y no hay agrupamientos significativos.

COMPONENTES DE MAGNETIZACION POR CÍRCULOS MAYORES EN RÍO LORO Y LA GUAJIRA

Se aplicó el método de círculos mayores a especímenes con sobreimposición de componentes o donde la sensibilidad del magnetómetro no permitió aislar componentes que caigan al origen. Cincuenta y tres especímenes en la sección de Río Loro se agruparon por nivel estratigráfico y dominio estructural (BAYONA 2003). La convergencia de los círculos mayores es aproximadamente a 180° del origen en varios especímenes (e.g., Fig. 5A). En especímenes de Río Loro, la convergencia ocurre en el sector sur y con inclinaciones negativas, y el trayecto asumido por las direcciones de remanencia residual de algunos especímenes se acerca al punto de intersección (e.g., Fig. 5B). Utilizando las direcciones obtenidas en intervalos con $n>4$ y círculos acercándose al punto de intersección (e.g., Fig. 5B), se obtiene una dirección media $D=185$ $I=-42$ $a95=13.3$ $k=18.4$ (Fig. 6A). Al hacer la corrección por buzamiento, la dispersión de las direcciones aumenta ($k=5.3$, Fig. 6B). En La Guajira, 18 especímenes se agruparon por formaciones y en dominios estructurales. La convergencia de círculos mayores ocurre hacia

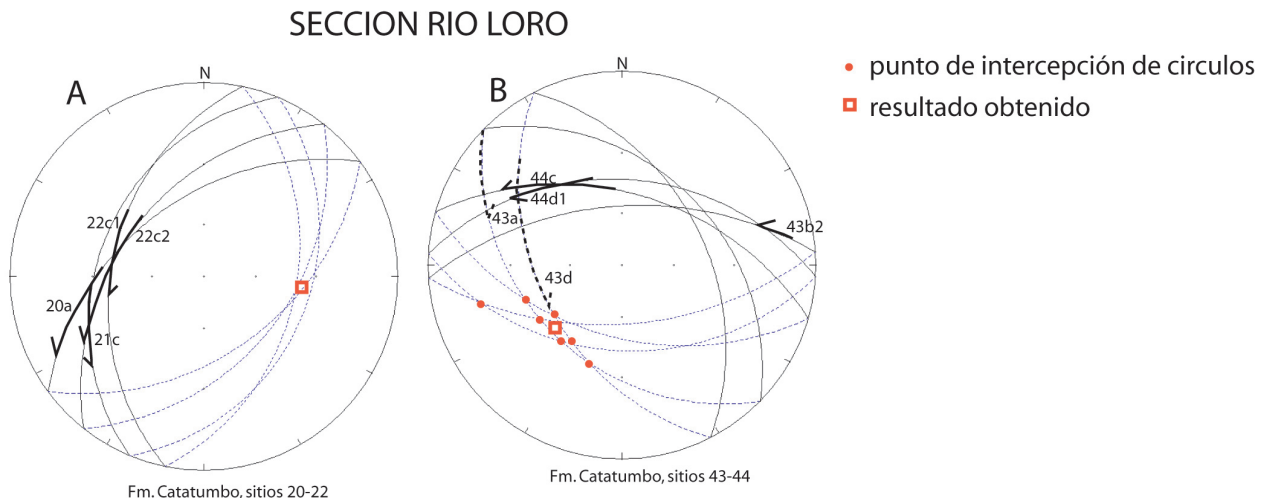


Fig. 5. Círculos de remagnetización (Río Loro). Línea sólida= hemisferio inferior; línea punteada= hemisferio superior. Mientras en A el sector de intersección de los círculos es a 180° del punto de inicio, en el diagrama B el sector de intersección es próximo al origen de algunos especímenes.

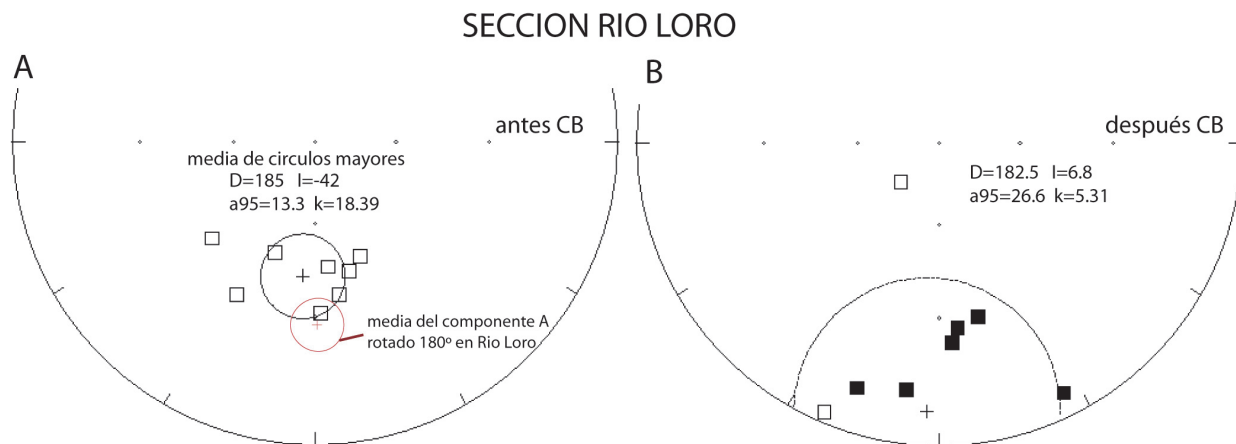


Fig. 6. Estereogramas de igual área mostrando las direcciones por círculos mayores aisladas en Río Loro [cuadrado relleno (abierto) indica inclinaciones hacia abajo (arriba)]. **A.** Para el cálculo de la dirección media en Río Loro se excluyen intervalos con $n < 4$, o sitios cuya intercepción es claramente a 180° del origen (ver Fig. 5A). La dirección media antipodal del componente A derivado del análisis de componentes principales permite comprobar que la dirección estimada por círculos mayores no es antipodal a la del componente A. **B.** La dispersión de las direcciones aumenta al realizar la corrección por buzamiento (CB), indicando un evento de magnetización post-plegamiento.

el sur, pero con inclinaciones positivas y negativas y su grado de agrupamiento no cambia después de hacer la corrección por buzamiento (BAYONA 2003).

COMPONENTES DE MAGNETIZACIÓN EN COSGUA

En esta sección se aislaron dos direcciones con declinaciones al norte y al sur, e inclinaciones someras a moderadas (Fig. 4E). Estas direcciones fueron aisladas en 23 especímenes; solo en 3 sitios al tope de la Formación Socha Superior y en 1 sitio en la base de la Formación Concentración se pudo calcular la dirección media. Por este motivo, el tratamiento estadístico se realizó a nivel de espécimen. Estas direcciones se aislaron a temperaturas entre $250\text{-}680^\circ\text{C}$, y las direcciones con declinación norte se agruparon como componente A (16 especímenes). El resultado de la dirección media del componente A antes de la corrección por buzamiento es $D=359.7$ $I=17$ $k=66.9$ $a95=4.5$. Al hacer la corrección por buzamiento, la dispersión de estas direcciones aumentan ($k=33.7$). Los restantes 7 especímenes tienen declinaciones al sur; cuatro especímenes con inclinaciones negativas, y tres especímenes con inclinaciones positivas (estas últimas colectadas en el mismo sitio).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

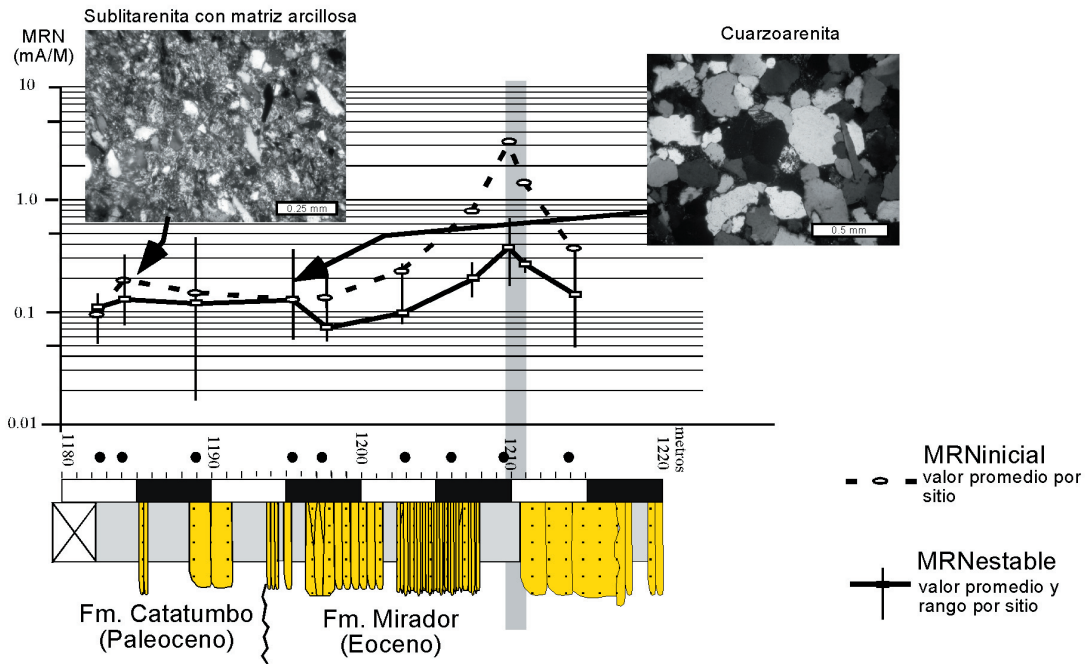
El componente característico de magnetización no fue posible aislarlo confiablemente en casi 90% de los especímenes analizados. Un inconveniente para aislar el componente de más alta temperatura (posiblemente llevada por hematita) fue la generación de óxidos al calentar las muestras a $>350^\circ$ en las tres secciones. Sin embargo, la

dirección de la hematita puede ser híbrida y es imposible diferenciar el componente primario del secundario (V. Costanzo-Alvarez, comunicación escrita, 2003).

El componente A fue aislado en todas las unidades de las tres secciones, a excepción de la Formación Picacho, y puede ser el resultado de magnetización viscosa ó remagnetización química post-Miocena. Las direcciones del componente A aisladas a muy bajas temperaturas/coercividades ($< 150^\circ\text{C}/15$ mT) son asociadas a magnetización viscosa. La estabilidad del componente A a intervalos entre $200\text{-}350^\circ\text{C}/30\text{-}60$ mT en la sección de Río Loro y >60 mT/hasta 650°C en la Guajira y en sitios de la Formación Mirador en Río Loro, y a temperaturas de 680°C en Cosgua indican el crecimiento de diferentes minerales ferromagnéticos durante la migración de fluidos.

Esta suposición es soportada por la presencia del componente A en intervalos que facilitan la migración de fluidos, como los contactos. En la sección de Río Loro, el componente A se aisló principalmente al tope de secuencias granocrecientes en la Formación Catatumbo (Fig. 2) o en la Formación Mirador. Al graficar la intensidad promedio por sitio de la MRN inicial y la MRN de componentes aislados a temperaturas $>150^\circ\text{C}$ o coercividades >15 mT se observa un incremento gradual de las intensidades en un contacto litológico dentro de la Formación Mirador (Fig. 7A). Aunque este cambio no ocurre en la discordancia reportada a la base de la Formación Mirador, recientes investigaciones palinológicas reportan una sección condensada a nivel de este contacto (JARAMILLO *et al.* 2006). El mismo gráfico para el contacto entre las formaciones Mito Juan y Catatumbo (Fig. 7B) muestra un incremento

A)



B)

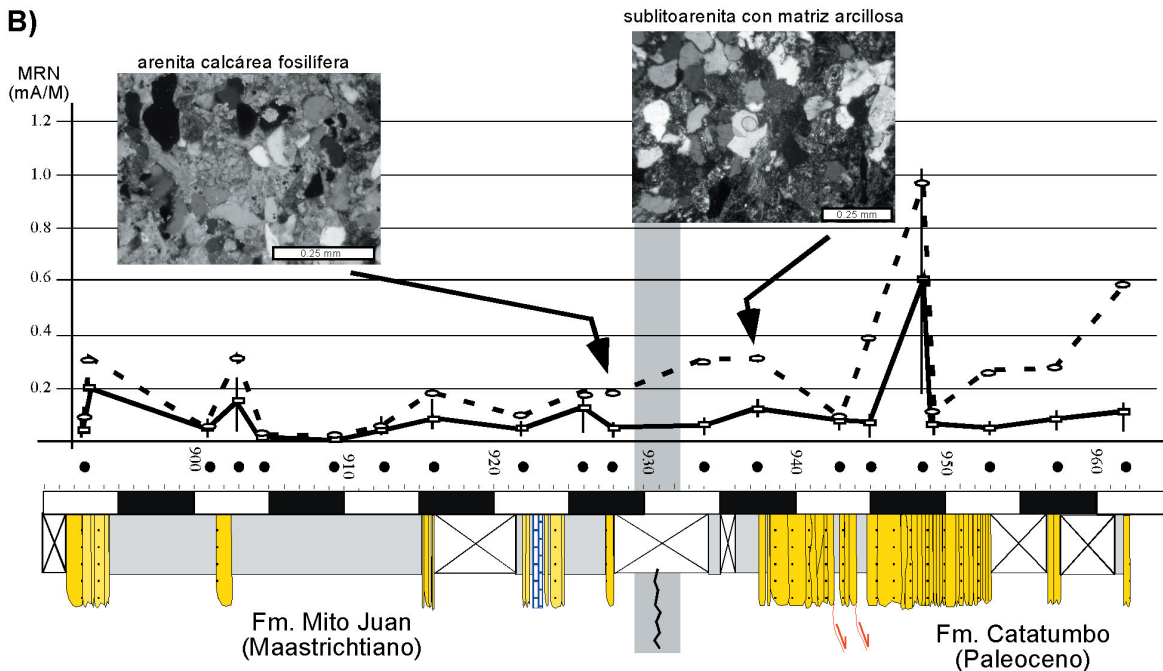


Fig. 7. Variación de intensidad del Magnetización Remanente Natural (MRN) inicial y estable (a temperaturas >150°C o coercividades >15 mT) en la sección de Río Loro. Note el cambio de escala del MRN entre A y B. A) El cambio de intensidad se observa en un contacto lodo-arena en la sección condensada de la Formación Mirador (JARAMILLO *et al.* en prensa). B) Un incremento general de la intensidad se observa en capas suprayaciendo el límite Maastrichtiano-Paleoceno y en el primer intervalo arenoso de la Fm. Catatumbo. Este último contacto está relacionado con un cambio de petrofacies, como lo muestran las fotografías de secciones petrográficas. El cambio de petrofacies en A es más evidente en el contacto discordante a la base de la Fm. Mirador. Las secciones estratigráficas parciales son modificadas de YEPES (2001). Ver figura 2 para explicación de símbolos.

Tabla 1. Direcciones medias para el componente A en cada sección.

Información de los sitios/especímenes utilizados para calcular la dirección media

N/Nt=numero de sitios con n>3 y k>20/ total de sitios por formación

- D=declinación; l=inclinación; cb=corrección por buzamiento

- a95=ángulo medio del 95% de confianza de la dirección media

- k=parametro de precisión de FISHER (1953)

Sección	Formación	dominio estructural	Stios N/Nt	Especímenes	D	l	a95	k	Dcb	lcb	a95	k
Río Loro	Mirador	buzando al NNW	3/8									
	Catatumbo-Mito Juan	buzando al NNW	13/77									
	Catatumbo	buzando al SSE	2/5									
	total		18/90		359.3	28.1	7.4	22.8	359.9	-18	14.1	7
Guajira	Hato Nuevo	buzando al SE	1/4									
	Manantial	buzando al SE	7/13									
	total		8/17		357.7	26.9	8.7	41.36	8.6	45.6	9.6	34.3
Cosgua	Socha Inferior	buzando al W		3								
	Socha Superior	buzando al W		14								
	Socha Superior	buzando al E		3								
	Concentración	buzando al W		3								
	total			23	359.7	17	4.5	66.9	2	-21.6	6.4	33.7

general de las intensidades después de un intervalo cubierto que concuerda con un cambio de petrofacies y asociación de palinomorfos. El límite entre el Maastrichtiano y Paleoceno se ha localizado en este intervalo (JARAMILLO *et al.* 2006). En la Guajira, el componente A aislado a >600 °C/>60 mT está en estratos de areniscas finas de la Formación Manantial. En Cosgua, el componente A se aisló a altas temperaturas principalmente en sitios localizados en los contactos infrayacentes y suprayacentes de la Formación Picacho, y en los intervalos arenosos de la Formación Socha Superior.

Los círculos de confianza de la dirección media del componente A antes de la corrección por buzamiento en las tres secciones se sobrepone (Fig. 6; Tabla 1), sugiriendo una edad post-plegamiento para los eventos de magnetización del componente A. Si consideramos las direcciones al sur con inclinaciones negativas en Río Loro (n=4), en la Guajira (n=2) y en Cosgua (n=4) como antipodal, el evento de remagnetización por precipitación química tomaría un intervalo de tiempo más largo que un crón de polaridad.

Las direcciones asignadas como componente B en las secciones de Río Loro y Guajira sugieren un evento de magnetización pre-plegamiento, pero estadísticamente es difícil comprobar que estas direcciones corresponden al mismo evento de magnetización. En un análisis visual de las direcciones del componente B por espécimen después de la corrección por buzamiento se observa un agrupamiento en direcciones normales e inversas. El agrupamiento de las direcciones normales tiene una alta

variación en declinaciones (distribución no fisheriana). La prueba de rumbo (SCHWARTZ & VAN DER VOO 1983) (Fig. 8), comprueba la pobre correlación entre la variación de las declinaciones magnéticas con las variaciones del rumbo de las capas, lo que significa que la variaciones en declinación no es producto de rotaciones a lo largo de ejes verticales durante la deformación. Los bajos valores de k (k < 20) no permiten comprobar si estas direcciones son estadísticamente antipodales.

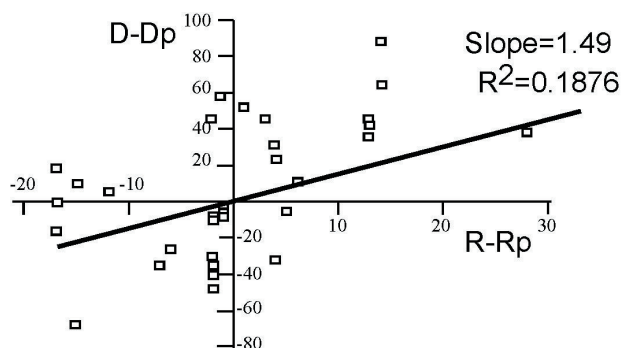


Fig. 8. Prueba de rumbo para las direcciones del componente B mostrando la pobre correlación entre la variación por declinación magnética (D) y el rumbo de los estratos (R). El azimut promedio de declinación (Dp) es 341 y de rumbo de las capas (Rp) es 330.

El variado rango de temperatura de desbloqueo/coercividad y el aislamiento de direcciones normal e inversa en diferentes especímenes del mismo sitio hace más difícil explicar el origen del denominado componente B.

Mientras en Río Loro el componente B es el único componente de magnetización aislado o tiene temperaturas de desbloqueo/coercividades mayores del componente A, en la Guajira el componente B es aislado en su mayoría a temperaturas de desbloqueo/coercividades menores del componente A. Una posible explicación es que las direcciones de magnetización asignadas al componente B registren un evento de precipitación de diferentes minerales magnéticos en ambas secciones en un periodo de tiempo superior a un crón de polaridad. El tiempo de la magnetización secundaria es posterior a la acumulación (post-Paleoceno) y previo al plegamiento.

La dispersión de las direcciones en el grupo C puede corresponder a errores en el proceso de toma y preparación de especímenes o a direcciones magnéticas con una interpretación muy complicada y sin soporte estadístico.

Las direcciones obtenidas por el método de círculos mayores tienen que revalidarse por otros métodos que integren observaciones directas (McFADDEN & McELHINNY 1988). Los resultados preliminares en Río Loro indican que el componente contenido en los círculos mayores es un evento de remagnetización, pero estadísticamente no corresponde a la dirección inversa del componente A (Fig. 6A). Además, sus inclinaciones son moderadas en comparación con las altas inclinaciones negativas in situ del componente B en especímenes de Río Loro.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los resultados de éste estudio indican que un componente de magnetización producto de un evento de remagnetización química post-deformación fue aislado en unidades del Paleógeno de las secciones de Río Loro, La Guajira y Cosgua. En este trabajo es evidente: (1) la compleja asociación de minerales magnéticos, (2) la dificultad de aislar el componente primario de magnetización en rocas sedimentarias del Paleógeno, y (3) el registro de varios eventos de magnetización secundaria asociados muy probablemente a la migración de fluidos en diferentes eventos orogénicos del Cenozoico. En futuros intentos de aislar el componente primario de magnetización, se aconseja enfocar el muestreo en intervalos de grano más fino o en intervalos de intercalaciones de areniscas y lodolitas y lejanos a contactos litológicos abruptos y/o discordantes. Además, es necesario realizar un muestreo más intenso (10 especímenes por sitio) para verificar si estadísticamente este componente corresponde a un evento de magnetización.

Los componentes de remagnetización asociados con migración de fluidos orogénicos han sido utilizados para re-orientar pozos de perforación (CIOPPA *et al.* 2000) y

caracterizar contactos que sirvieron como vías preferenciales de migración de fluidos y foco de alteración química (COSTANZO-ÁLVAREZ *et al.* 2000). Un muestreo más detallado (cada metro en intervalos de 15 m por encima y debajo del contacto) puede refinar las observaciones del incremento de intensidades del MRN en discordancias tipo paraconformidad, como entre las formaciones Mito Juan y Catatumbo (Fig. 7B), ó en secciones condensadas como el reportado en la Formación Mirador (Fig. 7A). En la Guajira, el componente A fue aislado en capas de areniscas finas lodosas de la Formación Manantial, que suprayace discordantemente la Formación Hato Nuevo. En Cosgua, el componente A fue comúnmente aislado en capas adyacentes a los contactos inferior y superior de las cuarzoareniscas de la Formación Picacho. Estos contactos sirvieron como posibles conductos por donde migraron los fluidos orogénicos. A nivel regional, este estudio confirma la dificultad de determinar el tiempo de magnetización de los componentes debido a la posición estable latitudinal de Sudamérica (MACDONALD & OPDYKE 1984). La alta dispersión de las direcciones del componente B y la pobre correlación en la prueba de rumbo también sugieren que estos datos no son propicios para el análisis de rotaciones.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Fundación para la promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República y el ICP-ECOPETROL S.A. El muestreo para este estudio se realizó en varias jornadas de campo entre el 2002 y el 2003 a las cuales nos asistieron los geólogos Javier Sánchez, Fabio Ortega y Carlos Ortega, estudiantes y profesores de las universidades UPTC (Sogamoso), UNAL (Bogotá) y UIS (Bucaramanga), geólogos de Carbones del Cerrejón, y Scott Wing. Agradecemos a Oscar Yepes y Andrés Pardo por facilitarnos sus columnas estratigráficas de las secciones Río Loro y Cosgua, respectivamente. El muestreo en rocas frescas en la mina del Cerrejón no hubiera sido posible sin el permiso de Carbones de Cerrejón, y en especial a Camilo Montes por su apoyo en la logística y toma de muestras. El proceso de desmagnetización en la Universidad de Florida fue realizada por Kainian Huang. El procesamiento de las muestras de la Formación Cerrejón (primera fase) en la Universidad de Buenos Aires fue realizado por Carlos Vásquez. Augusto Rapalini y el equipo de profesores del INGEO-DAV (Universidad de Buenos Aires) fueron de gran soporte durante el procesamiento de las muestras de Río Loro y La Guajira. Adriana Castaño y Carlos Durán colaboraron en la preparación y desmagnetización de especímenes en Bogotá y Buenos Aires. Agradecemos a Neil Opdyke (Universidad de Florida) por sus sugerencias en los resultados paleomagnéticos de la sección de Cosgua. Las conversaciones con Vincenzo Costanzo-Álvarez (Universidad Simón Bolívar) y Augusto Rapalini (Universidad de Buenos Aires) fueron de gran ayuda para la interpretación de los datos aquí reportados. Los comentarios de un revisor anónimo a este manuscrito contribuyeron a mejorar la presentación de estos datos paleomagnéticos; sin embargo, las interpretaciones son responsabilidad exclusiva de los autores.

REFERENCIAS

AYALA CALVO, R. C., VELOZA, G., BAYONA, G., GOMEZ CASCALLAS, M., RAPALINI, A. E., COSTANZO-ÁLVAREZ, V. &

- ALDANA, M. (2005): Paleomagnetismo y mineralogía magnética en las unidades del Mesozoico de Bucaramanga y Macizo de Floresta, *Geología Colombiana*, v.30, p. 49-66.
- BAYONA, G. (2003): Paleomagnetismo del Paleoceno-Eoceno en Río Loro y Guajira: ICP-ECOPETROL S.A., Reporte interno, 16 p.
- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., PARDO, A., CHRISTIE, A. & HERNÁNDEZ, G. (2004): Important Paleotectonics and chronostratigraphic considerations of the Late Paleocene in the northernmost Andes as constrained by Paleocene rocks in the Cerrejón coal mine, Guajira, Colombia. Memorias en CD de la Tercera Convención Técnica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 14p.
- BAYONA, G., SILVA, C., RAPALINI, A. E.; COSTANZO-ÁLVAREZ, V., ALDANA, M. & RONCANCIO, J. (2005): Paleomagnetismo y Mineralogía Magnética en rocas de la Fm. Saldaña y unidades Cretácicas suprayacentes en la parte norte del Valle Superior del Magdalena. *Boletín de Geología de la UIS*, v. 27, n. 2, p. 69-85.
- BAYONA, G., RAPALINI, A., & COSTANZO-ÁLVAREZ, V. (en prensa): Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the Northern Andes and its Implications in Mesozoic Tectonics of Northwestern South America, *Earth Planets and Space*, Edición especial de Paleomagnetismo en Latinoamérica.
- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., & REYES-HARKER, A. (en revisión): Tectonic-Eustatic controls and diachronism of Basin-wide Flooding Surfaces in the Paleocene-Miocene Nonmarine Foreland Basin of Colombia. Enviado a *Journal of Sedimentary Research*.
- BENAMMI, M., URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., ALVA-VALDIVIA, L. M., CHAIMANEE, Y., SOMCHAI, T. & JAEGER, J. (2002): Magnetostratigraphy of the Middle Miocene continental sedimentary sequences of the Mae Moh Basin in northern Thailand: evidence for counterclockwise block rotation, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 204, p. 373-383.
- BERGGREN, W. A., KENT, D. V., SWISHER II, C. C. & AUBRY, M. (1995): A revised Cenozoic Geochronology and Chronostratigraphy, in Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M., and Hardenbol, J., eds., *Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM Special Publication CD 54, p. 129-212.
- CANDE, S. C. & KENT, D. V. (1995): Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 6093-6095.
- CASTILLO, J., GOSE, W. A. & PERARNAU, A. (1991): Paleomagnetic results from Mesozoic strata in the Mérida Andes, *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 6011-6022, Venezuela.
- CÉSPEDES, S. & PEÑA, L. (1995): Relaciones estratigráficas y ambientes de depósito de las formaciones del Terciario Inferior aflorante entre Tunja y Paz del Río, Boyacá, (tesis de grado). 50 p. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- CHIGNE, N., LOUREIRO, D. & ROJAS, E. (1997): El piedemonte de la Cordillera Oriental de Colombia y de los andes de Mérida; Estilos estructurales y consideraciones sobre la génesis y migración de hidrocarburos, en VI Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas", p. 457-477, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Cartagena, Colombia.
- CIOPPA, M. T., SYMONS, D., GILLEN, K. & LEWCHUCK, M. (2000): Paleomagnetism provides alternative for core orientation methods, *Oil & Gas Journal*, v. May, p. 46-53.
- COOPER, M. A., ADDISON, F. T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R. H., HAYWARD, A. B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A. J., & TABORDA, A. (1995): Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 79, p. 1421-1443.
- CORTÉS, M., BAYONA, G., ARISTIZABAL, J., OJEDA, G., REYES-HARKER, A., AND GAMBA, N. (2006): Structure and kinematics of the Eastern Foothills of the Eastern Cordillera of Colombia from Balanced Cross-Sections and Forward Modelling. *Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo*, Memorias del IX Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas, 14p.
- COSTANZO-ÁLVAREZ, V., WILLIAMS, W., PILLOUD, A., MIRÓN, O. & ALDANA, M. (2000): Paleomagnetic results from remagnetized mid-Cretaceous (Albian-Cenomanian) strata of northeastern, *Geophysical Journal International*, v. 141, p. 337-350, Venezuela.
- ETAYO-SERNA, F. (1979): Moluscos de una capa del Paleoceno de Manantial (Guajira): *Boletín de Geología*, v. 13 (27), p. 5-55, Bucaramanga, Colombia.
- FISHER, R. A. (1953): Dispersion on a sphere: *Proceedings of the Royal Society of London*, v. Series A217, p. 295-305, London.
- GERMERAAD, J. H., HOPPING, C. A. & MULLER, J. (1968): Palynology of Tertiary sediments from tropical areas: Review of Palaeobotany and Palynology, v. 6, p. 189-348.
- GÓMEZ, E., JORDAN, T., ALLMENDINGER, R. W. & CARDOSO, N. (2005): Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 117, p. 1272-1292; doi: 10.1130/B25456.1.
- GOSE, W. A., PERARNAU, A. & CASTILLO, J. (2003): Paleomagnetic results from the Perijá Mountains, Venezuela: an example of vertical axis rotation, in Bartolini, C., Buffler, R. y Blickwede, J., eds., *The Gulf of Mexico and Caribbean region: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 79, 965-975.
- GRADSTEIN F.M., OGG J.G. & SMITH A. (2005): *A Geologic Time Scale 2004*: Cambridge University Press, New York, 610 p.
- HAUGHT, L., COLLEY, B. & BELDING, H. (1944): Geology of the Cesar - Rancheria Valley and Commissary of Guajira: *Geological report Tropical Oil Company N. 449*, 449.

- JARAMILLO, C. (2001): Middle Paleogene palynology of central Colombia, South America: A study of pollen and spores from tropical latitudes: *Palaeontographica Abt. B.*, v. 258, p. 87-213.
- JARAMILLO, C., BAYONA, G., PARDO, A., MEJIA, V., OPDYKE, N. & SANCHEZ, J. (2002): Constraining the Age of Synorogenic Continental Paleogene Strata in the Eastern Cordillera of Colombia, South America, A Combined Palynological and Paleomagnetic Approach, in EOS Transactions Fall meeting supplements 83(47), p. Abstract GP71A-0978.
- JARAMILLO, C., RUEDA, M. & MORA, G. (2006): Cenozoic Plant Diversity in the Neotropics. *Science*, v. 311, p. 1893-1896.
- JASON, C., PILLOUD, A., CANACHE, M., FARIAS, A., PIEMONTI, C. & CONSTANZO-ALVAREZ, V. (2000): Comparison of published time scales, Paleocene-Miocene; Are the differences between scales significant for oil exploration, in VII Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas", p. 37-51, Venezuela.
- KENNETT, J. P. & STOTT, L. D. (1991): Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene, *Nature*, p. 225-229.
- KIRSHVINK, J. L. (1981): The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 62, p. 699-718.
- MACDONALD, W. D. & OPDYKE, N. D. (1984): Preliminary paleomagnetic results from the Jurassic rocks of the Santa Marta Massif, Colombia, in Bonini, W. E., Hargraves, R. B., and Shagam, R., eds., *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*, Geological Society of America Memoir 162, p. 295-298.
- MAZE, W. B. (1984): Jurassic La Quinta Formation in the sierra de Perijá, northwestern Venezuela; geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks, in Bonini, W. E., Hargraves, R. B., & Shagam, R., eds., *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*, Geological Society of America Memoir 162, p. 263-282.
- MCELHINNY, M. W. (1964): Statistical significance of the fold test in paleomagnetism, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 8, p. 338-340.
- MCFADDEN, P. L. & MCELHINNY, M. W. (1988): The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in paleomagnetism, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 87, p. 161-172.
- MONTES, C., BAYONA, G., JARAMILLO, C., OJEDA, G., MOLINA, M., & HERRERA, F. (2005): Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and Subsidence in the Cesar-Rancheria Valley: Rigid-Beam Pivot Model. *Memorias ampliadas del 6th International Symposium of Andean Geodynamics*, p. 520-523.
- NOLTIMIER, H. (1983): Application of magnetic reversal stratigraphy to middle Pennsylvanian coal and shale within the Appalachian basin and abroad, in Spring Meeting, Appalachian Basin Industrial Associates, p. 4-31, North Carolina.
- OLIVER, J. (1986): Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena, *Geology*, v. 14, p. 99-102.
- PARDO, A., JARAMILLO, C. & OBOH-IKUENOBE, F. (2003): Paleogene Palynostratigraphy of the Eastern Middle Magdalena Valley, *Palynology*, v. 27, p. 155-178, Colombia.
- PARDO, A. (2004): Paleocene-Eocene Palynology and Palynofacies from northeastern Colombia and Western Venezuela [Ph. D. Dissertation thesis]: Universite de Liege, 103 p.
- POCKNALL, D. T., ERLICH, J. A., STEIN, J. A. & LORENTE, M. A. (1997): A Cretaceous-Tertiary boundary section at Rio Lora, Merida Andes, Western Venezuela, in VI Simposio Bolivariano, p. 552-564, Cartagena, Colombia.
- SARMIENTO-ROJAS, L. F. (2001): Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes; Inferences from tectonic models: Bogotá, ECOPETROL-Netherlands Research School of Sedimentary Geology, 295 p.
- SCHWARTZ, S. Y. & VAN DER VOO, R. (1983): Paleomagnetic evaluation of the orocline hypothesis in the Central and Southern Appalachians, *Geophysical Research Letters*, v. 10, p. 505-508.
- SLOAN, L. C. & MORRIL, C. (1998): Orbital forcing and Eocene continental temperatures: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 144, p. 21-35.
- STAMATAKOS, J., HIRT, A. M. & LOWRIE, W. (1996): The age and timing of folding in the central Appalachians from paleomagnetic results: *Geological Society of America Bulletin*, v. 108, p. 815-829.
- TORO, J., ROURE, F., BORDAS-LE FLONCH, N., LE CORNEC-LANCE, S. & SASSI, W. (2004): Thermal and kinematic evolution of the Eastern Cordillera fold and thrust belt, Colombia, in Swennen, R., Roure, F., & Granath, J. W., eds., *Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts: AAPG Hedberg Series*, no. 1, p. 79-115.
- UJUETA, G. & LLINÁS, R. D. (1990): Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la sierra de Perijá, *Geología Colombiana*, v. 17, p. 197-209, Bogotá.
- VAN ANDEL, T. H. (1958): Origin and classification of Cretaceous, Paleocene, and Eocene sandstones of western Venezuela, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 42, p. 734-763.
- VAN DER HAMMEN, T. (1954): The development of Colombian flora throughout geologic periods, I, Maastrichtian to Lower Tertiary, *Boletín Geológico Ingeominas*, v. 2, p. 49-106, Bogotá.
- VAN DER KAARS, W. A. (1983): A palynological-Paleoecological study of the Lower Tertiary coal-bed sequence from El Cerejón, *Geología Norandina*, v. 8, p. 33-48.
- VILLAMIL, T. (1999): Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 153, p. 239-275.

- WING, S. L., ALROY, J. & HICKEY, L. J. (1995): Plant and mammal diversity in the Paleocene to Early Eocene of the Bighorn Basin, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 115, p. 117-155.
- WING, S. L., ALROY, J. & HICKEY, L. J. (1993): Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective: Journal of Geology, v. 101, p. 191-213.
- YEPES, O. (2001): Maastrichtian - Danian dinoflagellate cyst biostratigraphy and biogeography from two equatorial sections in Colombia and Venezuela, Palynology, v. 25, p. 217-249.
- ZIJDERVELD, J. D. A. (1967): A.C. demagnetization of rocks: analysis of results, en Collison, D. W., Creer, K. M., and Runcorn, S. K., eds., Methods of Paleomagnetism, Elsevier Science, p. 254-286.
- ZACHOS, J. C., LOHMANN, K. C., WALKER, J. C. & WIDE, S. W. *Manuscrito recibido Febrero 2006; aceptado Octubre 2006.*