



ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

PROYECTO DE GRADO

DEFORMACIÓN DE LOS SEDIMENTOS PERTENECIENTES A
LA FORMACIÓN PENDERISCO, EN RESPUESTA A LA
COLISIÓN DEL BLOQUE CHOCÓ, CIUDAD BOLIVAR,
COLOMBIA

DANIEL FELIPE GÓMEZ VARGAS

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al Título de Geólogo

Asesorado por:
PH. D JOSE FERNANDO DUQUE TRUJILLO
MEDELLÍN
2017

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

El fondo Corrigan ACGGP – ARES que, con la aceptación, apoyo y financiación, se logró llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de grado.

La universidad EAFIT, que por parte del Departamento de Ciencias de la Tierra y el departamento de Practicas Profesionales, se logró el semestre de práctica modalidad investigativa en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Juriquilla, Querétaro.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Juriquilla y el investigador Ph. D Roberto Stanley Molina Garza que, con su asesoría de grado y acompañamiento me brindaron el espacio de trabajo en el laboratorio de Paleomagnetismo. También a todas las personas que en Querétaro fueron compañía y asesoría académica.

Total, y grado agradecimiento a la Beca Universitaria ANDI – EAFIT, con la cual y su incondicional apoyo fue posible completar mis estudios en la universidad. Al departamento de Beneficios y Compensación, el cual con la calidez y apoyo fueron de gran ayuda durante los semestres de estudio.

Al Departamento de Deportes y en especial al grupo representativo de Natación, un grupo excepcional de amigos donde se contribuyó al desarrollo personal y deportivo personal. Por igual, al grupo de expresión artística Movimiento Danza y su departamento de Artes, y a todos los bailarines con los cuales compartí tantos momentos de desarrollo artístico y personal.

A mis compañeros de semestre, Yenny Valencia, Alejandra Díaz, Alejandra Tovar, Susana Toro, Laura Rengifo, Silvana Castillo, Daniela Cardona, Camila León, Laura Soto, Ana Contreras, Daniela Mejía, Leidy Ortiz, David Cuellar, Daniel Bedoya, Francisco Barbosa, Mateo Sanín, Esteban Gómez, Oscar Mariño, Víctor Piedrahita, y a todas las personas con las cuales compartí los trabajos de campo y las experiencias tan gratificantes en la estancia en la universidad.

En general a todo el Departamento de Ciencias de la tierra que con sus docenes y trabajadores representan una guía a seguir en la construcción de esta hermosa profesión.

Un agradecimiento muy especial a Jose Fernando Duque que con su apoyo y ayuda marco el rumbo de este proyecto con su experiencia y recomendaciones.

DEDICATORIA

A mis padres, hermano y familia

DEFORMACIÓN DE LOS SEDIMENTOS PERTENECIENTES A LA FORMACIÓN PENDERISCO, EN RESPUESTA A LA COLISIÓN DEL BLOQUE CHOCÓ, CIUDAD BOLIVAR, COLOMBIA

Gómez-Vargas, D.F.^a; Duque-Trujillo, J.F.^a; Molina-Garza, R.S.^b

^a Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

^b Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

Resumen

Mediante la técnica de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) a determinar la petrofábrica de la roca, 15 sitios de la Formación Penderisco (Miembro Urrao) en el suroeste Antioqueño, fueron muestreados para describir las variaciones en el tipo de fábricas y el grado de deformación que representan a lo largo del transecto comprendido entre Ciudad Bolívar y Carmen de Atrato. La técnica analítica de ASM se basa en la relación existente entre la deformación y el tipo de fábrica magnética presente en la roca. En el caso del presente estudio, la evaluación de la fábrica magnética permite interpretar el tensor de esfuerzo principal relacionados a la deformación ocurrida en respuesta a la colisión entre el bloque Panamá-Chocó y la margen NW de Suramérica.

La historia de deformación del occidente de Colombia está enmarcada en la acreción de terrenos y acomodación de esfuerzos, siendo estos los elementos claves para entender la configuración actual de las rocas y relaciones estructurales. A razón de esta configuración, los parámetros de la ASM revelan un incremento en la fábrica magnética original, que probablemente fue adquirida por la acción del movimiento de las fallas contiguas. Se interpreta la alineación de las lineaciones magnéticas con la etapa de depositación para algunos sitios, y luego en acuerdo con la dirección propuesta a la colisión se sobre imprime una fábricas compuestas o tectónicas en un ambiente compresivo. Por tal razón acordamos una dirección de acreción en sentido W-E, lo cual se ajusta a los rasgos deformacionales actualmente observados en las rocas de la Formación Penderisco.

Introducción

La acreción del Bloque Choco y cierre del istmo de Panamá representa un tema de debate para definir los procesos evolutivos que llevo a colisionarse con la margen noroccidental de Suramérica. Este tema de discusión radica en que no se conoce con claridad cuál era la dirección de desplazamiento que tenía el Bloque Chocó y su cinemática del choque en el momento que colisiona con el continente (Duque-Caro, 1990; Cediél et al., 2003; Acosta, 2004; Coates et al., 2004; Montes et al., 2005; Suter et al., 2008; Farris et al., 2011; Villagómez et al., 2011; Montes et al., 2012) generando un plegamiento de la secuencia sedimentaria depositada en la cuenca de Fore-arc (Duque-Caro, 1990). Contando con que poco se conoce la temporalidad del cierre del istmo, y es de importancia entender la relevancia sobre procesos orogénicos en el norte de Suramérica.

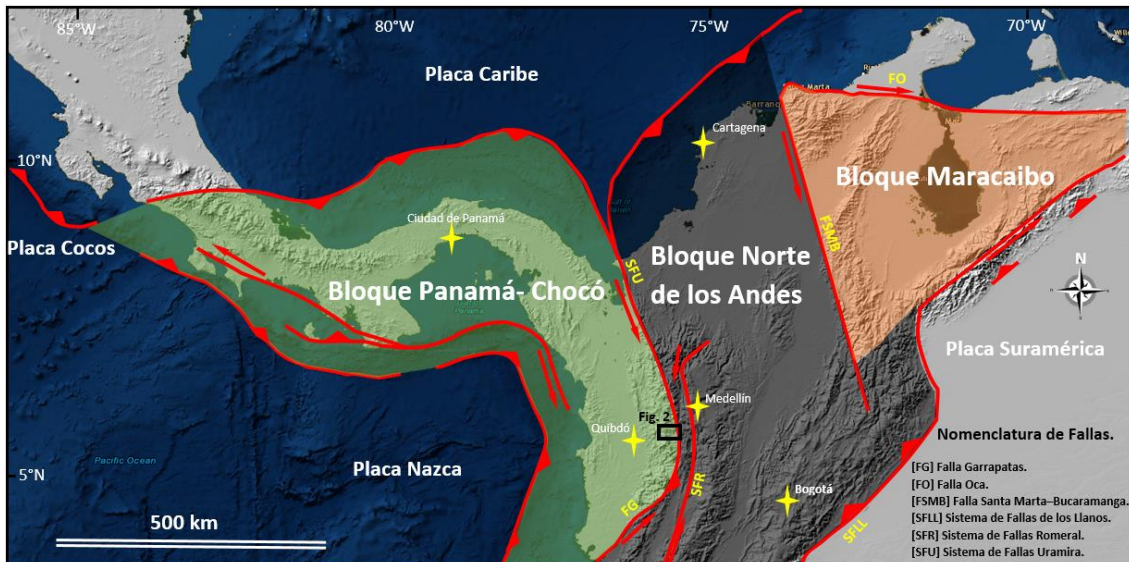


Figura 1. Mapa tectónico simplificado del Noroeste de Suramérica mostrando los principales dominios estructurales. Modificado de Cediél et al., 2003; Suter et al., 2008 y Taboada et al., 2000. Imagen tomada de programa Geosur, <http://www.geosur.info/geosur>.

La Formación Penderisco es una secuencia sedimentaria caracterizada por la estratificación rítmica y fina de limotitas, lutitas, litoarenitas y chert (Calle et al., 1983), estos sedimentos se habrían depositados en un ambiente turbidítico en el cierre de una cuenca tipo Fore-arc (Duque-Caro, 1990), formada entre el Bloque Chocó y la margen noroccidental de Suramérica (Suter et al., 2008). La colisión del Bloque Chocó habría generado la obducción y deformación de estos sedimentos poniéndolos en la posición que actualmente los encontramos.

El presente trabajo se centra en la determinación de la cinemática de la colisión del Bloque Chocó a partir de la caracterización de los esfuerzos principales de compresión por medio de la técnica de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM). Esta técnica permite establecer relaciones entre las fábricas magnéticas y los patrones de esfuerzos principales.

Marco Geológico

El presente trabajo se centra en la Formación Penderisco, una formación sedimentaria que hace parte del Grupo Cañasgordas (Álvarez, 1971). Esta se caracteriza por tener dos miembros, uno denominado Miembro Urrao, con composición areno-arcilloso y otro con composición calcáreo-lidítico, denominado Miembro Nutibara. Esta descripción fue realizada por primera vez por Álvarez y González (1978). El grupo Cañasgordas es una unidad lito-estratigráfica compuesta por una secuencia de rocas volcano-sedimentarias agrupadas bajo el nombre de Formación Barroso (Álvarez y González, 1978; Rodríguez y Arango, 2013) y una secuencia de rocas sedimentarias denominada Formación Penderisco. Mejía y Salazar (1989) y Rodríguez y Arango (2013) describen que el Grupo Cañasgordas se constituye por un basamento de composición basáltica de afinidad oceánica T-MORB, observado en la unidad más infrayacente: Diabasas de San José de Urama. Posteriormente, Calle et al., (1983) caracteriza el Miembro Urrao como una estratificación rítmica y fina de limolitas, lutitas, litoarenitas y chert detallándola como una secuencia de sedimentos arcillosos, arenáceos y silíceos, depositados en un ambiente turbidítico distal (Álvarez, 1978; González y Londoño, 2003) estos se encuentran plegados y fallados, indicando una actividad tectónica que los afecta y desarrolla estructuras pizarrosas y esquistosidad en algunas localidades (Álvarez y González, 1978; Calle et al., 1983; Díaz, 2015).

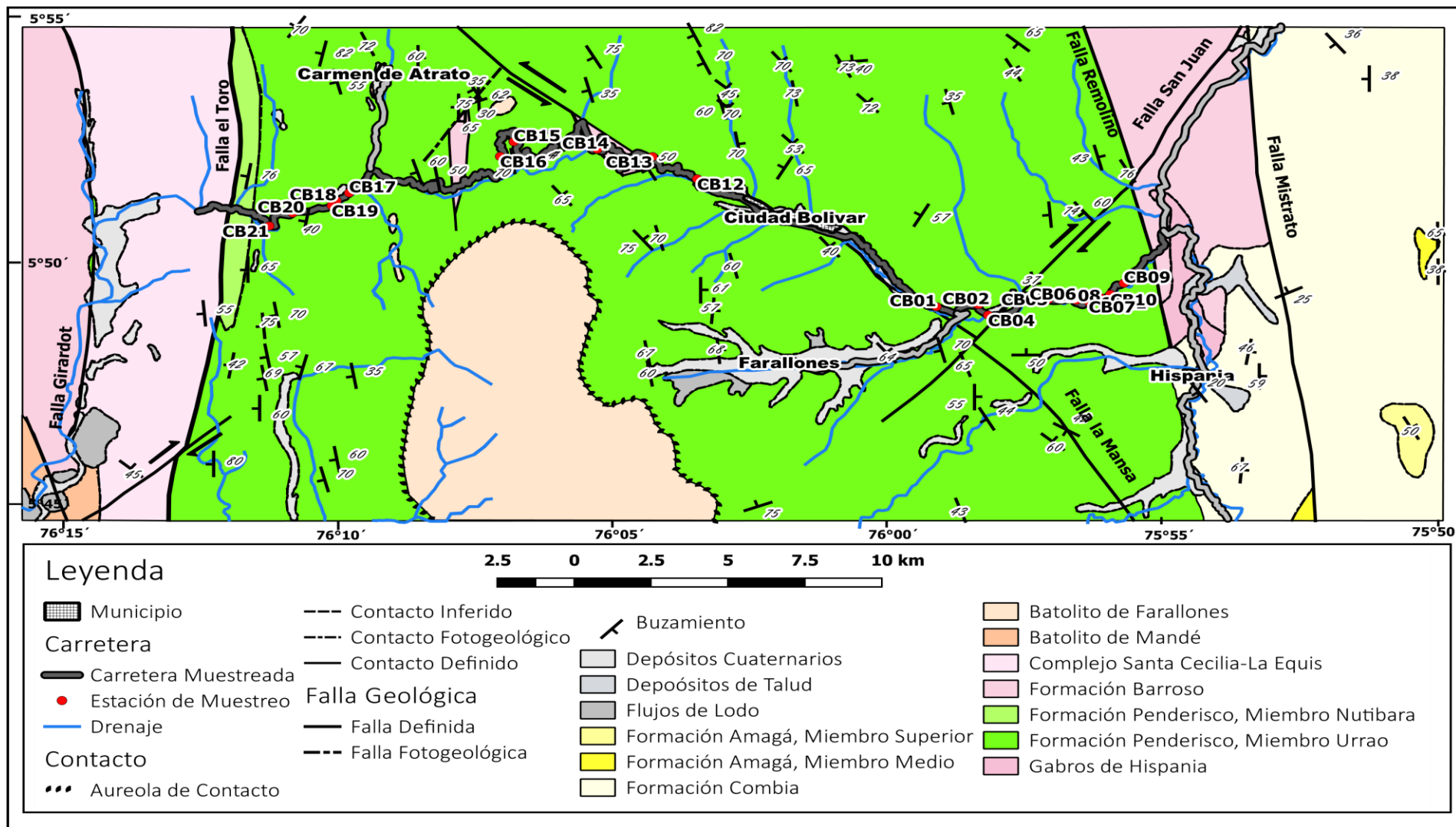


Figura 2. Mapa geológico regional de la Formación Penderisco mostrando la estratigrafía, configuración estructural y carretera de estudio.

La Formación Penderisco aflora a lo largo del flanco oriental de la Cordillera Occidental. En cercanías a la zona de estudio se encuentra limitada por la falla Mistrató y Falla del Rio Verde (Cossio, 1994; Gómez et al., 2007), correspondientes al sistema de fallas Cauca-Romeral (Case et al., 1971; González, 1977; Kammer, 1993; Kerr et al., 1997), este sistema de fallas, consideradas actualmente activas, se ha caracterizado como el límite que diferencia los basamentos y rocas afines de la Cordillera Central de la Cordillera Occidental (Grosse, 1926; Case et al., 1971; González, 1977; Barrero 1979; Gómez 2001; Chicangana, 2005). Al oriente de la Formación Penderisco y en contacto fallado aflora la Formación Barroso, una unidad vulcano-sedimentaria constituida por basaltos, andesitas, aglomerados, tobas y sedimentitas marinas, distribuidas paralelamente a la Formación Penderisco (Álvarez,1971; Álvarez y González,1978; Rodríguez y Arango, 2013). El límite occidental de la Formación Penderisco está marcado por el contacto fallado con el Complejo volcánico Santa Cecilia-La Equis, distinguida por brechas, tobas estratificadas, flujos lávicos básicos y aglomerados, (Salazar et al., 1991; Calle y Salinas, 1986; González, 1996; Gonzáles y Londoño, 2003) esta formación a su vez esta intruida por el Batolito de Mandé de composición granodiorítica y tonalítica (Álvarez, 1971; Botero, 1975; Rodríguez y Zapata, 2011). Autores como Álvarez (1971), Calle y Salinas, (1986), denominan el conjunto de estos dos complejos, Santa Cecilia-La Equis y Batolito de Mandé, como los que conforman el arco Chocó-Panamá, el que a su vez hace parte de la configuración tectónica del norte de Suramérica.

El borde noroccidental de América del Sur, está comprendido desde el este de Panamá hasta el noroeste de Colombia, $\sim 5^\circ$ a 8° de latitud norte (González et al., 2014; Duque-Caro, 1990) es reconocido por ser la zona de interacción de tres grandes placas tectónicas, como lo es la placa Caribe, Nazca y Suramericana, además la configuración actual se ve completada por dos microplacas denominadas Panamá-Costa Rica y Andes del Norte (Pennington, 1981; Kellogg et al., 1985; Suter et al., 2008). La interacción convergente de las placas tectónicas se ve representada por la orogenia y deformación que hoy distingue el noroccidente de Colombia y Panamá (Duque-Caro, 1990; Taboada et al., 2000).

Metodología

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) es un método empleado para determinar la petrofábrica de las rocas, esta herramienta está diseñada para determinar la orientación preferencial de los minerales magnéticamente dominantes, además de ser implementada para la interpretación de deformación y procesos geológicos que sufren las rocas (Graham, 1966; Hrouda, 1982; Borradaile, 1988; Tarling y Hrouda, 1993; Parés et al., 1999; Soto et al., 2009; Borradaile y Jackson, 2010, entre otros).

La ASM se basa en la teoría de fábrica magnética, la cual muestra la orientación de los minerales magnéticos dominantes que constituyen la roca, es decir que minerales aportan a la magnetización (Dinarès-Turell et al., 1991; Hongn et al., 1999; Maffione et al.,2015). Esta teoría se explica a partir de la propiedad física que tienen ciertos minerales de ser magnetizados bajo un campo magnético determinado, y así influir en la susceptibilidad magnética (Borradaile, 1988; Dinarès-Turell et al., 1991; Hongn et al., 1999).

Geoméricamente la ASM se representa por un tensor simétrico de segundo orden, esto cuando la susceptibilidad sea anisotrópica, en donde sus ejes son los equivalentes a la magnitud y orientación de sus direcciones, por lo cual se habla de ejes de susceptibilidad magnética (Hrouda, 1982; Dinarès-Turell et al., 1991; Tarling y Hrouda, 1993; Hongn et al., 1999; Caballero, 2011). Estas direcciones dependen de la configuración interna que tiene la roca, lo cual está

constituido por la mineralogía, forma, concentración del grano y su tamaño (Tarling y Hrouda, 1993). Las direcciones se definen como K_1 (máximo), K_2 (intermedio) y K_3 (mínimo) lo cual se representa gráficamente por un elipsoide, en donde sus tres ejes ortogonales corresponden a ser $K_1 > K_2 > K_3$, y por tal motivo las variaciones en intensidad, orientación y grado de magnetización de la fábrica magnética repercuten en las variaciones de la ASM (Tarling y Hrouda, 1993; Hongn et al., 1999; Ramirez 2012). La fábrica magnética está determinada por la orientación del eje máximo (K_1), la cual determina la lineación magnética, representado en el elipsoide cuando $K_1 > K_2 > K_3$, adquiriendo una forma oblata, según Bouchez et al. (1997) este es el indicador cinemático más importante ya que con este se puede definir de manera más rápida el tipo de fábrica. La segunda característica que compone la fábrica magnética es la foliación magnética, este elemento está representado por el plano que contiene a K_1 y K_2 pero que es perpendicular a K_3 , es decir el polo del plano, gráficamente se observa en el elipsoide cuando $K_1 \gg K_2$ adquiriendo una forma prolata (Dinarès-Turell et al., 1991; Tarling y Hrouda, 1993; Hongn et al., 1999; Parés et al., 1999). Las fábricas magnéticas se han clasificado en seis tipos: I, II, III, IV, V y VI, que obedecen a la deformación de la roca (Parés et al., 1999; Aubourg et al., 2004; Chadima et al., 2006; Robion et al., 2007).

La aplicación de esta metodología se ha empleado en diferentes litologías, esto a partir de los estudios realizados por diferentes autores en los que proponen la técnica de ASM como relevante, al encontrar equivalencias entre la fábrica magnética y el elipsoide de deformación con la fábrica sedimentaria, magmática o tectónica (Graham, 1954; Dinarès & Parés, 1992; Hongn et al., 1999). Por tal razón, su implementación en rocas sedimentarias ha demostrado resultados que apoyan las interpretaciones con respecto a su formación y/o posteriores procesos geológicos que inciden en su deformación (Parés et al., 1999; Soto et al., 2009; Maffione et al., 2015). Las rocas sedimentarias se caracterizan por adquirir una fábrica magnética primaria o inicial, a lo cual se le denomina "fábrica sedimentaria", esta es adquirida en el momento de la depositación y posterior diagénesis de los sedimentos (Tarling y Hrouda, 1993; Parés et al., 1999; Cifelli et al., 2005; Soto et al., 2009; Borradaile y Jackson, 2010). La representación de este tipo de fábrica se observa con un elipsoide de forma prolata, asociado a la dispersión de los ejes K_1 y K_2 en el plano que los contiene y con un K_3 perpendicular a la estratificación, esto demostrando la foliación magnética, la cual igualmente es subparalela a la estratificación; pero este tipo de fábrica puede ser parcialmente sobreimpresa o modificada por una fábrica tectónica durante la deformación, a lo cual el eje máximo del elipsoide (K_1) se alinea subparalelo al eje máximo del estiramiento (Dinarès y Parés, 1992; Tarling y Hrouda, 1993; Parés et al., 1999; Borradaile y Jackson, 2010). En rocas sedimentarias se han descrito tres tipos de fábricas, estas según el esfuerzo deformacional que afecta la roca, las cuales son fábricas sedimentarias, fábricas intermedias o fábricas tectónicas (Parés et al., 1999; Robion et al., 2007; Borradaile y Jackson, 2010).

De acuerdo con la configuración de las direcciones triaxiales K_1 , K_2 y K_3 representadas en el elipsoide, estas pueden describir una forma oblata, prolata o triaxial, interpretado incluso como la magnitud (Jelinek, 1977, 1978; Hrouda, 1982; Jackson y Tauxe, 1991; Tarling y Hrouda, 1993; Soto et al., 2009). La ASM emplea el análisis de parámetros anteriormente mencionados, como la foliación magnética (F) y la lineación magnética (L) lo cual permite entender la trama mineral. Otros parámetros descritos, son el grado de anisotropía corregido (P' o P_j) utilizado para conocer la intensidad con la cual los minerales magnéticos se orientan y determinan la fábrica magnética (Nagata, 1961; Jelinek, 1977, 1981; Chadima et al., 2006). La susceptibilidad magnética media (K_m) determina qué tipo de mineral, Ferromagnético o Paramagnético el cual es el responsable de indicar la fábrica magnética, siendo esta la susceptibilidad mayor (Tarling y Hrouda, 1993). El

parámetro de forma (T) indica la excentricidad del elipsoide, este depende, si $T > 0$ donde adopta una forma oblata y define una fábrica planar. Cuando $T < 0$, la forma del elipsoide es prolata, indicando una fábrica lineal (Jelinek 1981; Tarling y Hrouda, 1993). Estos parámetros cuantitativos deben ser interpretados con la ayuda de la configuración estructural regional y la litología, para un complemento de los resultados, al encontrar que el elipsoide de susceptibilidad magnética y el elipsoide de deformación son coaxiales (Borradaile 1988).

El análisis de deformación por medio de la ASM en rocas sedimentarias requiere del estudio de los parámetros anteriormente descritos. La ASM se complementa a partir de los parámetros 1 y f , estos son extraídos de los parámetros F y L con el fin de obtener el ángulo entre la lineación magnética (L) con respecto a un plano de estratificación, de igual manera, obtener el ángulo entre la foliación magnética (F) según un plano de estratificación medido (Tarling y Hrouda, 1993; Chadima et al., 2006). Según Robion et al. (2007), existe un mejor parámetro para indicar la fábrica magnética de una roca sedimentaria, este parámetro es el $K3\pi SO$ el cual define un ángulo a partir del eje K_3 (polo del plano K_1, K_2) y el plano de estratificación.

Para la aplicación de la técnica de ASM se realizó la toma de muestras cilíndricas orientadas de 2,5 cm de diámetro a lo largo del transecto de la carretera Ciudad Bolívar – Carmen de Atrato. Los sitios de muestreo se seleccionaron según se presentó la complejidad del afloramiento con base a lo indicado por Chadima et al. (2006), en donde se consideran características como la estratificación, clivaje, plegamiento y ejes de plegamiento. Además, según Jelinek (1977, 1978) se muestrearon mínimo 6 núcleos por sitio, con la intención de poder reducir el margen de error. Posteriormente los núcleos se cortaron en muestras de 2,2 cm de altura, esto con la intención de tener la medida estándar para ser medidos en el equipo Kappabridge (KLY-3, AGICO) suministrado por el Centro de Geociencias (CGeo) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este equipo representa los tensores de susceptibilidad según 15 direcciones en las que se deben disponer la muestra conforme a lo preestablecido por Jelinek (1981). Los parámetros son obtenidos utilizando el Software Anisoft 4.2 (AGICO), en el cual la representación gráfica de la ASM se lleva a cabo por medio de proyecciones ecuatoriales sobre el hemisferio inferior, en donde una convención de cuadros, círculos y triángulos serían los equivalentes a K_1, K_2 y K_3 (Ellwood et al., 1988). Posteriormente se emplea la gráfica de grado de anisotropía (P_j) Vs el Parámetro de forma (T) con el fin de determinar la forma del elipsoide y evolución de la fábrica magnética.

Resultados

El flanco oriental de la Cordillera Occidental se ha descrito como una cuenca de tipo Fore-Arc, la cual en la actualidad se caracteriza por el desarrollo de pliegues y cabalgamientos orientados en sentido N-S. El transecto comprendido entre Ciudad Bolívar Y Carmen de Atrato se ha interpretado como la parte más distal de la cuenca donde se depositaron los sedimentos, siendo esta porción uno de los frentes más deformados por el cierre de la cuenca en consecuencia de la tectónica acrecional (Fig. 2). Las lodolitas, limotitas y litoarenitas de la Formación Penderisco, Miembro Urrao, exhiben un plegamiento intenso en un área muy acotada, donde las fábricas magnéticas son claramente identificables, pero presentaremos evidencias de deformación en flancos de pliegues donde aparentemente los estratos no se encuentran deformados.

Los parámetros de ASM de la Formación Penderisco se expresan según el promedio de cada parámetro analizado (Ver Metodología), de acuerdo con todas las muestras obtenidas por cada sitio. El *Bulk* de la susceptibilidad magnética se encuentra en el rango de 49,93 a 802 x 10⁻⁶ SI, presentando una mayor frecuencia en 152,8x10⁻⁶(Fig. 3a). La susceptibilidad (K_m) de los sitios

varía entre 9.12×10^{-5} y 7.51×10^{-4} , denotando que la principal distribución de la concentración es bimodal, teniendo los máximos de frecuencia en 2.86×10^{-4} y 3.31×10^{-4} (Tabla 1), contando con el valor más alto perteneciente al sitio CB-16. El grado de anisotropía Pj se encuentra entre 1.010 y 1.040, determinados como valores bajos. El sitio CB-06 obtiene el valor más elevado, dado que el promedio se encuentra en 1.021. De acuerdo con estos últimos parámetros, el diagrama Km vs Pj (Fig. 3b) permite identificar los minerales que controlan la susceptibilidad magnética (Rochette 1987; Borradaile, 1988; Rochette et al., 1992), y a partir del cual se define la predominancia de los resultados en el campo ferromagnético, debido a que la totalidad de los datos son mayores a $Km > 10^{-6}$ SI. A su vez, el parámetro de forma T predomina con una forma achatada ($0 < T < 1$) (Fig. 3c) el cual representa el 60% de los sitios, y por igual porcentaje un 20% para elipsoides prolatos y triaxiales. A partir de estos parámetros, en la gráfica Pj vs T (Fig. 3c) se observa el incremento de la deformación asociado a su evolución y el tipo de fábrica inicial.

Tabla 1.

Resultados de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) para el área de estudio.

Sitio	Coordenadas		N	K1	K2	K3	Km	Pj	T	F	L	Estratificación
	Norte	Oeste										
CB-01	5°49'20.24"	75°58'56.14"	10	1.007	1.003	0.989	0.912	1.022	0,271	1.014	1.007	065/28
CB-02	5°49'22.73"	75°58'12.65"	5	1.004	1.001	0,996	1.52	1.012	-0,019	1.006	1.006	078/21
CB-03	5°49'22.91"	75°58'11.57"	5	1.011	0,998	0,99	2.03	1.022	-0,204	1.009	1.013	115/34
CB-04	5°49'10.06"	75°58'1.45"	11	1.006	1.003	0,99	1.84	1.019	0,322	1.012	1.006	048/45
CB-05	5°49'28.92"	75°56'58.16"	9	1.013	1.001	0,986	2.86	1.030	0,093	1.016	1.013	074/75
CB-06	5°49'28.27"	75°56'28.28"	5	1.014	1	0,989	0.971	1.036	0,286	1.023	1.012	245/83
CB-07	5°49'26.51"	75°56'15.07"	10	1.008	1.000	0,992	1.94	1.020	0,034	1.009	1.010	254/90
CB-09	5°49'48.90"	75°55'38.06"	3	-	-	-	1.85	1.014	0,396	1.009	1.004	241/64
CB-11	5°49'31.40"	75°56'3.12"	9	1.014	1.001	0,985	3.02	1.031	0,133	1.017	1.013	072/52
CB-15	5°52'40.98"	76°06'22.72"	7	1.003	1.002	0,995	1.54	1.013	-0,06	1.006	1.007	121/41
CB-16	5°52'23.09"	76°06'37.12"	5	1.006	1.000	0,994	7.51	1.012	-0,105	1.006	1.007	203/42
CB-17	5°51'38.74"	76°09'16.63"	10	1.008	1.002	0,99	2.84	1.021	0,32	1.014	1.007	263/36
CB-19	5°51'23.33"	76°09'35.03"	7	1.012	1	0,991	3.10	1.024	0,014	1.012	1.012	252/52
CB-20	5°51'14.22"	76°10'16.32"	8	1.006	1.002	0,992	3.31	1.017	0,405	1.012	1.004	268/58
CB-21	5°50'58.49"	76°10'41.16"	8	1.009	1.000	0,991	3.13	1.021	0,101	1.012	1.009	118/70

Las coordenadas geográficas se expresan según el datum WGS84. N, es el número de especímenes analizados por cada sitio. K₁, K₂ y K₃ ejes principales de Susceptibilidad. (Km) Susceptibilidad media por cada sitio. Grado de Anisotropía Corregido (Pj), Parámetro de Forma (T), Foliación Magnética (F), Lineación Magnética (L) de acuerdo con Jelinek (1978). La Estratificación es expresada en Dip Direction/ Dip.

La distribución de los elipsoides se encuentra a lo largo de la carretera, pero una relación existente a partir de este grafico se observa con la predominancia de los elipsoides oblatos en el sector oriental del transecto.

Una correlación determinante puede ser observada entre la susceptibilidad magnética y el grado de anisotropía (Fig.3b), en donde en comparación con el diagrama Pj vs T se determina que los sitios con menor grado de anisotropía ($2.50 \times 10^{-4} < Km$) poseen elipsoides oblatos y prolatos (e.g CB-01, CB-02, CB-03, CB-04) mientras que los sitios con mayor anisotropía ($Km > 2.50 \times 10^{-4}$) solo poseen elipsoides oblatos (e.g CB-19, CB-20, CB-21).

Se identificaron cuatro tipos de fábricas magnéticas, a partir de los estereogramas de cada sitio (Fig. 4), donde se observa la distribución de los ejes K₁ y K₂ y el diagrama Pj vs T. Una fábrica magnética bien definida se ha identificado en 14 de los 15 sitios muestreados, contando con que

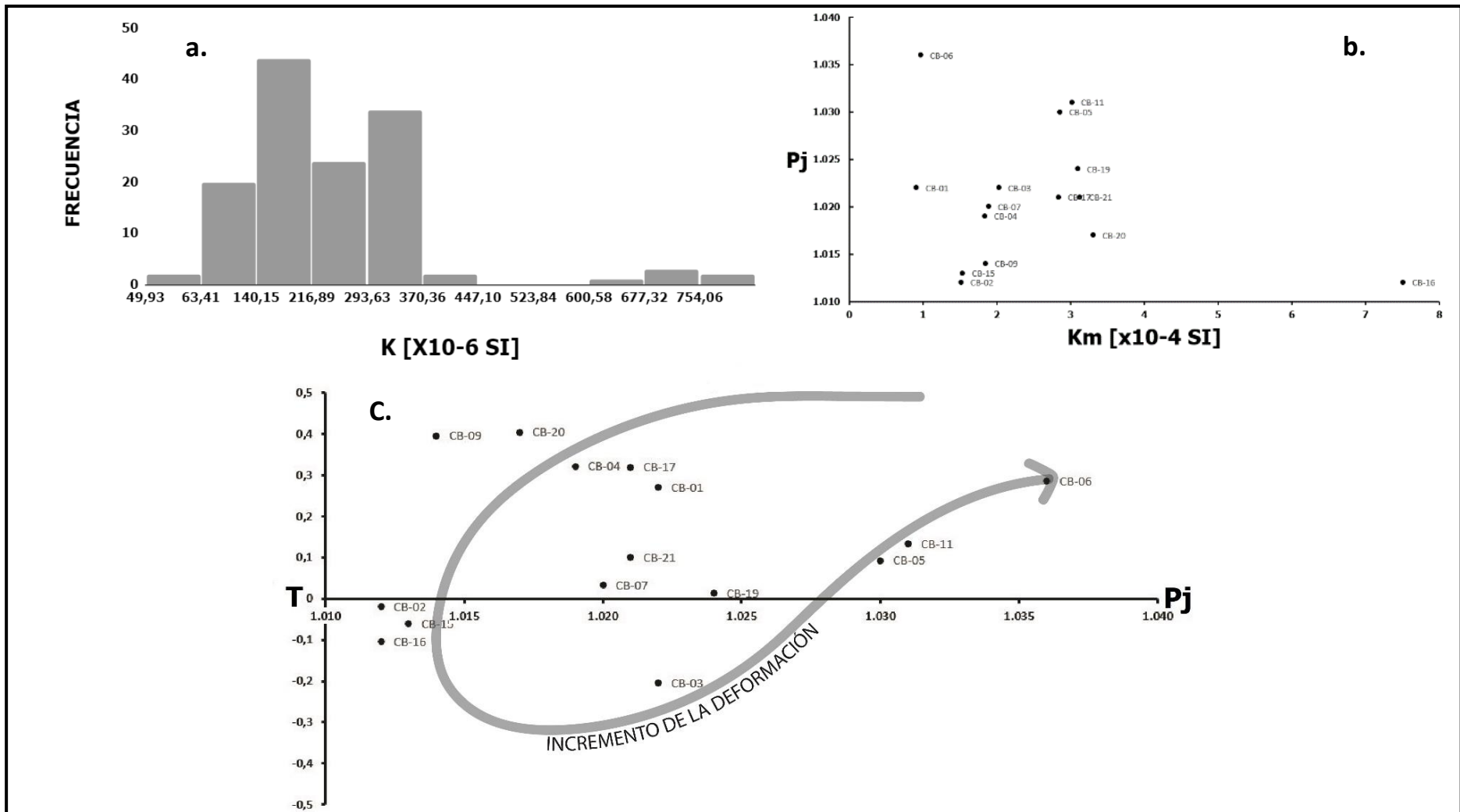


Figura 3. (a) Distribución de la susceptibilidad magnética (K) con respecto a la frecuencia. (b) Promedio de la susceptibilidad (K_m) para cada sitio versus el grado de anisotropía corregido (P_j). (c) Gráfico de correlación entre el grado de anisotropía corregido (P_j) y el parámetro de forma (T), demarcando el incremento de la deformación.

en el sitio CB-09 no fue posible identificar su fábrica magnética. Los resultados del sitio CB-01 representan un buen agrupamiento del eje menor en el centro, y una dispersión significativa de K_1 y K_2 en el plano, resultando en un elipsoide magnético oblató (Fig. 3c), de tal manera que el eje K_3 es normal a la estratificación reflejando el origen sedimentario de la ASM. Sin embargo, la dispersión de los ejes K_1 y K_2 de manera subhorizontal al plano de estratificación en sentido NNW-SSE se puede interpretar como un primer efecto de acortamiento en sentido E-W.

En la estación CB-03 (Fig. 5) el eje k_1 posee una inclinación subhorizontal, orientado preferentemente N-S, mientras que el eje mínimo se orienta al Norte, perpendicular al plano de estratificación. Aclarando que el elipsoide de esta muestra presenta valores negativos de T , lo cual lo ubica en el campo de la compresión. Continuando más al este, las estaciones CB-06, CB-11, CB-17, CB-19 y CB-21 (Fig. 5) presentan una característica distinta. La dirección de K_1 se orienta con dirección Sur y S-E, pero en lo referente a los ejes K_2 y K_3 definen una guirnalda subvertical orientada al NE-SW o NW-SE, definiendo una fábrica no sedimentaria. Una diferencia en particular resulta del aspecto similar que tiene la roca en estas estaciones con sitios que presentan una fábrica netamente sedimentaria. De acuerdo con esta observación se entiende que el primer efecto de la deformación es alinear el eje máximo perpendicularmente a la dirección de acortamiento o compresión y disponer los ejes intermedio y mínimo haciendo una guirnalda.

Las estaciones de muestreo CB-05, CB-07 y CB-16 (Fig. 5), presentan un agrupamiento bien definido de sus ejes de susceptibilidad, esta separación a 90° demuestra que la fábrica tectónica es débil y el elipsoide de la ASM es oblató. La distribución de ejes K_1 y K_2 conserva un paralelismo con el plano de estratificación, sugiriendo una fábrica tipo 2. Estas apreciaciones indican la transición a un elipsoide de tipo triaxial.

Los sitios CB-02, CB-04, CB-15 y CB-20 demuestran un agrupamiento del eje K_3 subvertical, se distinguen por una distribución en forma de guirnalda de los ejes K_1 y K_2 , donde esta distribución es subparalela al plano de estratificación. Una distribución en el diagrama de evolución del elipsoide de acuerdo con la deformación progresiva (Fig. 3c) indica una deformación moderada a fuerte, correspondiendo a fábricas tipo 4 (Parés et al., 1999; Aubourg et al., 2004; Chadima et al., 2006; Robion et al., 2007). Así, el eje de susceptibilidad mínima es normalmente perpendicular al plano de estratificación y el de susceptibilidad máxima es paralelo a la dirección de extensión.

La evolución de la forma del elipsoide de ASM sigue el progreso del incremento de la deformación donde la fábrica de la ASM tipo 1 se asocia a que está dominada por la estratificación, representado en elipsoides oblatos (zona este-centro del transecto estudiado). Este gradualmente pasa a ser dominado por elipsoides característicos de afectación tectónica (fábrica tipo 4) hacia los extremos este oeste de la carretera (Fig. 5).

La distribución de las direcciones máximas, intermedias y mínimas de susceptibilidad para cada sitio se representan en el mapa de la zona estudiada (Fig.5).

Discusión

Los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética en la Formación Penderisco reflejan la presencia de dos poblaciones en el tipo de fábrica magnética de acuerdo con las variaciones de susceptibilidad media y el grado de anisotropía corregido. Ambos parámetros presentan la predominancia de elipsoides oblatos según el agrupamiento de los ejes (Tarling y Hroudá, 1993), donde la distribución del eje máximo e intermedio son paralelos o subparalelos al plano de

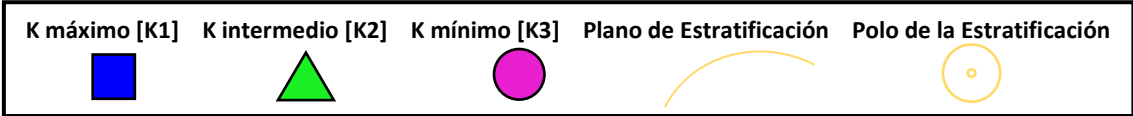
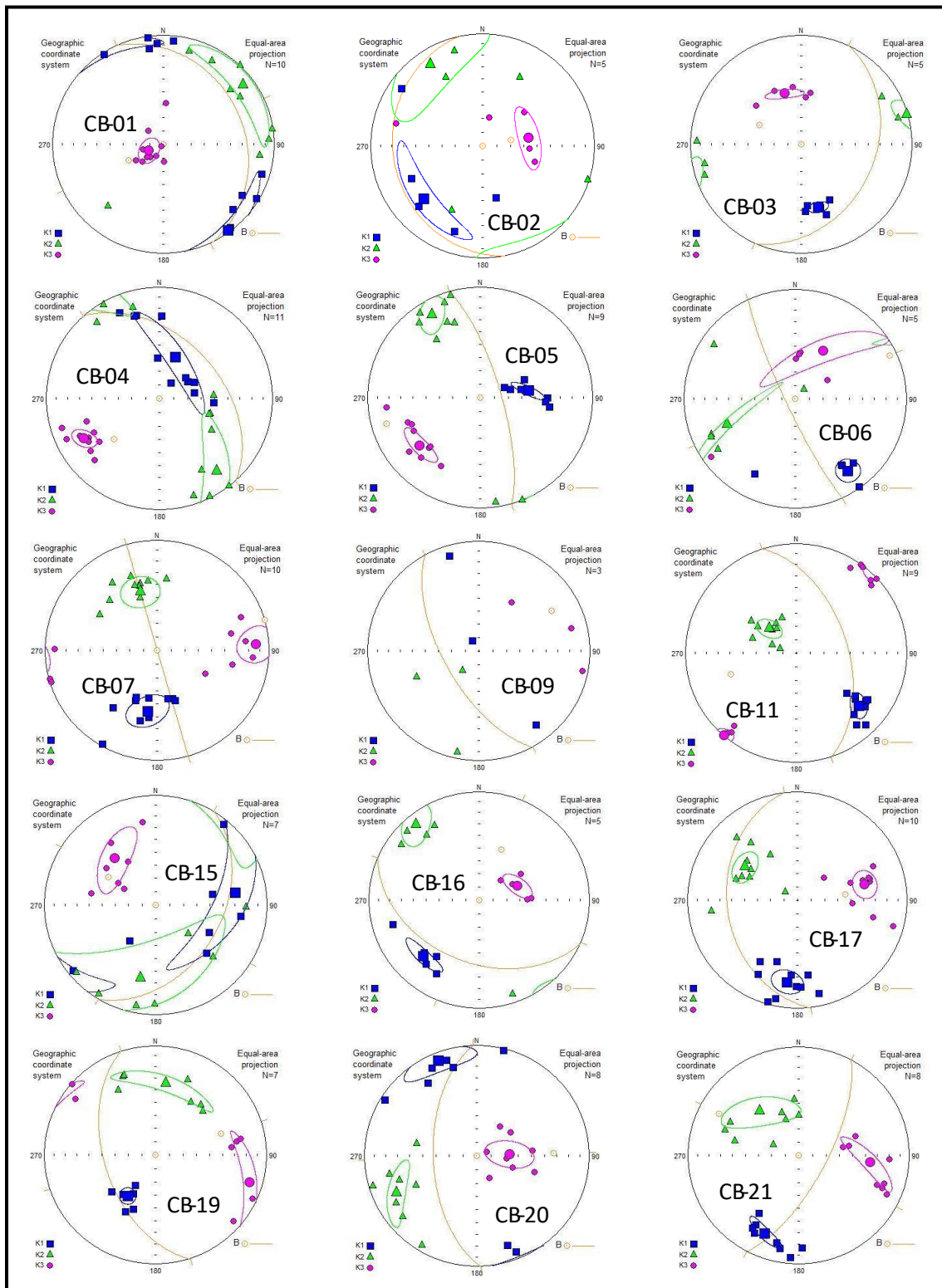


Figura 4. Proyecciones de los ejes de susceptibilidad sobre el hemisferio inferior. Se presenta todos los elipsoides de los sitios muestreados de acuerdo con las coordenadas in-situ. Se representa K_1 , K_2 Y K_3 , además del plano de estratificación y su respectivo polo.

estratificación y según el eje mínimo normal a este plano sugiere una fábrica magnética equivalente al estado inicial de la deformación (Pares et al., 1999). Esta relación plantea una fábrica primaria determinada por la estratificación adoptada poco después o durante de la depositación de los sedimentos finos y posterior diagénesis, de lo cual concluimos entonces que la foliación magnética para el sitio CB-01 es dominada por una fábrica magnética oblata tipo 1.

A partir del comportamiento de los especímenes medidos en el diagrama Pj vs T (Fig. 3c) se determina que el grado de anisotropía es bajo a moderado, debido a que sus valores se encuentran por debajo de 1.1 (Borradaile y Jackson, 2010), de lo cual se infiere a una asociación de terrenos acrecionados y deformados de rocas sedimentarias, en un ambiente de tipo Fore-arc, como los del presente estudio.

Como principal consideración, se debe tener en cuenta que debido a la predominancia de resultados bajos para la susceptibilidad total ($<370,36 \times 10^{-6}$) (Fig. 3a) y Pj menores que 1.1 se indica que ni la mineralogía ni la forma de los clastos son los responsables de la forma de los elipsoides de la ASM. Consecuente con esta consideración se sugiere que la susceptibilidad total es aportada por minerales paramagnéticos (Dinarès-Turell et al., 1991; Rochette, 1987; Borradaile, 1988; Borradaile y Henry, 1997; Caballero, 2011), por lo cual la anisotropía es impartida entonces por la estratificación o por una deformación posterior, ocurrida por acortamiento o compresión de capas en el momento del cierre de la cuenca como respuesta a la acreción del Bloque Panamá-Chocó sobre el margen noroeste de Suramérica.

Consecuente con el incremento de la deformación, se determinó un segundo grupo de fábrica magnética, una fábrica tipo 2, la cual comparte rasgos de una fábrica sedimentaria. Se distingue por la foliación magnética subparalela a la estratificación, de lo cual proponemos que estos especímenes al estar en una región plegada se localicen en los flancos y paralelos a los ejes del plegamiento (Fig. 5). Este tipo de fábrica empieza a demostrar una transición a un elipsoide triaxial (Pares et al., 1999; Borradaile y Jackson, 2010; McCarthy et al., 2014) y según esta apreciación se demuestra una pérdida progresiva de la foliación en los pliegues presentes del transecto estudiado.

Posteriormente, se logra determinar dos zonas consecuentes con una deformación mayor, localizadas a los extremos Este y Oeste de la carretera, caracterizadas por fábricas de tipo 3, donde la compresión adicional rota los granos alrededor de un eje horizontal para que K intermedio y K mínimo cambien de posiciones. K máximo permanece perpendicular y K mínimo es ahora paralelo al eje de acortamiento (Dinarès-Turell et al., 1991; Dinarès y Parés, 1992; Borradaile y Henry, 1997; Aubourg et al., 2004; Chadima et al., 2006; Borradaile y Jackson, 2010). Una aclaración importante para los especímenes que presentan este tipo de fábrica, es la distancia a la cual se encuentran separadas, por lo cual se propone que para el sector Este, la fábrica inicial era de tipo 1 o 2, esto a razón de la distancia con respecto al frente de acreción, pero el movimiento del Sistema de Fallas Cauca Romeral (Fig. 2 y 5) habría causado una sobre imposición de una fábrica magnética a tipo 3 y 4, diferenciándola del sector Oeste, donde se encuentra más cercano el frente de colisión y se caracteriza por una uniformidad en los sitios con una relación directa entre el eje K máximo y el plano de estratificación. Por consiguiente, se asume una gran cantidad de compactación horizontal.

A partir de las consideraciones de Pares et al. (1999), Aubourg et al. (2004) y McCarthy et al. (2014) se determina que el grado de deformación fue moderado a alto por la predominancia de fábricas magnéticas compuestas, consecuente con un determinado grupo de sitios que

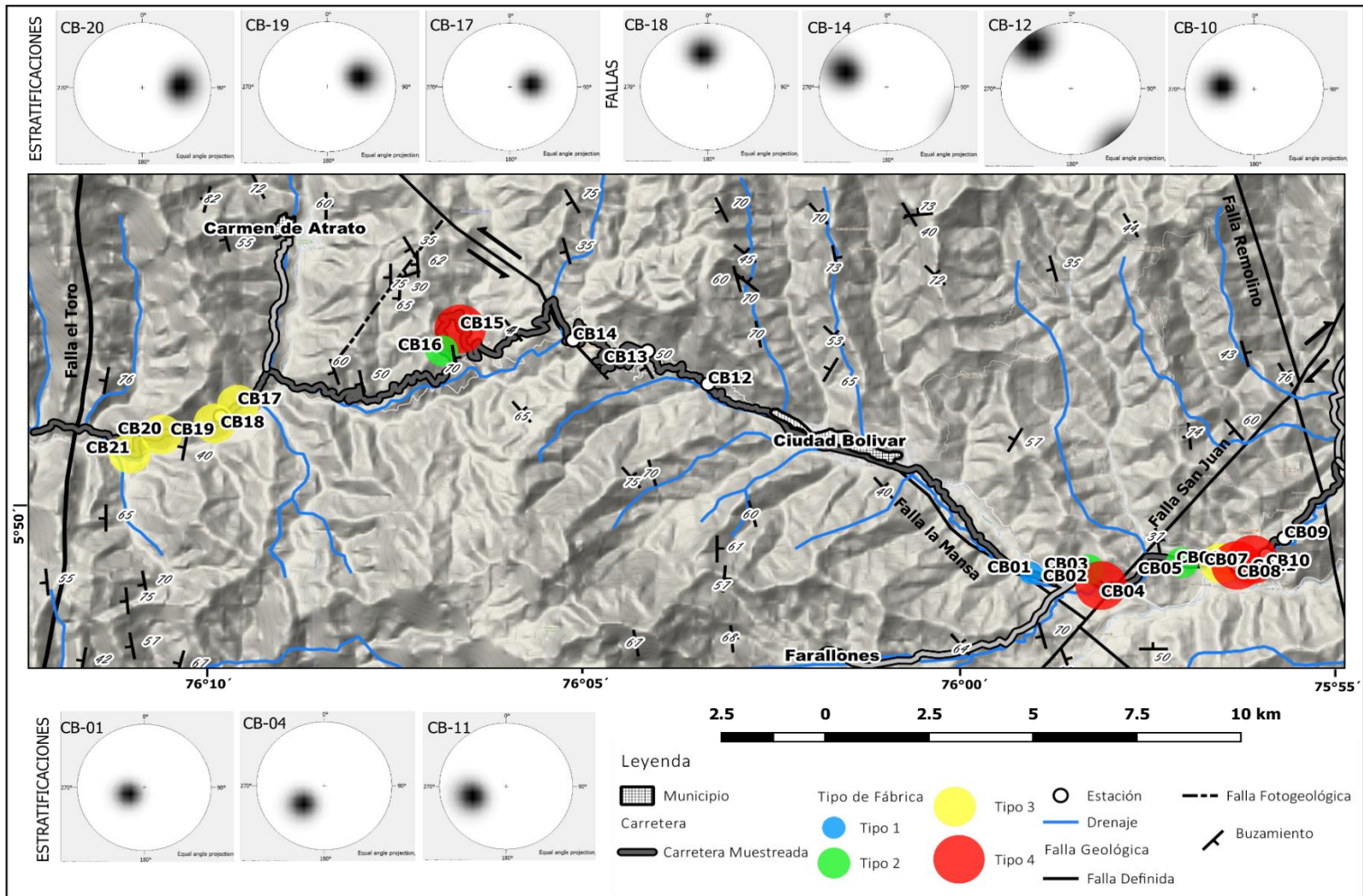


Figura 5. Mapa representativo de los estereogramas correspondientes a los sitios de muestreo y el tipo de fábrica. Los datos de buzamiento se expresan en Dip/Dip Direction. Imagen tomada de Google Physical.

presentan la fábrica magnética tipo 4 (Fig. 5). Este tipo de fábrica que muestra los valores más altos de susceptibilidad magnética total representa una reducción en el volumen de las rocas pertenecientes al prisma de acreción plegadas sobre el margen noroccidental de Suramérica. Nuestros resultados apoyan la observación que muestra una distribución mayoritaria de las foliaciones magnéticas normales a esta dirección de acreción. A razón de esta dirección, se generó una extensión del volumen en sentido N-S y un cambio positivo en el espesor de la secuencia.

Los resultados estructurales obtenidos a lo largo del transecto demuestran dos patrones de vergencia, lo cual en su mayoría son acordes o subparalelos a la dirección de acreción. Una predominancia de los planos de estratificación buzando hacia el NE o E es la mayor similitud encontrada con las foliaciones magnéticas de sitios que presentan una fábrica tipo 1, 2 y 4 (e.g. CB-01, CB-05, CB-11). Esta similitud la encontramos en el sector este y centro de la carretera (Fig. 5). Un segundo patrón de estratificación se ubica en la zona oeste de la carretera, en el cual el plano de buzamiento tiene una dirección predominante al W o SW y es acorde a la dirección de la lineación magnética de los sitios CB-17, CB-19, CB-20 Y CB-21 (Fig.5), asociado a una fábrica magnética tipo 3 predominante en este sector. En comparación, los planos de fallas presentan un predominio hacia el N y NE, buzando hacia el SW, cortando los planos de estratificación asociándolo al cabalgamiento de los estratos y desplazamiento de rumbo.

Se concluye por lo tanto que la lineación magnética registrada en la Formación Penderisco demuestra con claridad que hay una fábrica magnética adquirida por la deformación de los sedimentos, posiblemente debido al proceso de colisión con dirección E-W. Además la dirección de acreción inferida a partir de la disposición de los planos de lineación magnética es concordante con la dirección de colisión propuesta por Montes et al. (2012), Farris et al. (2011), Farris et al. (2017), indicando una importante actividad tectónica en el Eoceno por la acreción de terrenos alóctonos al norte de Suramérica entre los 25 a 10 Ma.

Conclusiones

La predominancia de fábricas magnéticas intermedias y tectónicas, son el reflejo de la deformación ocurrida con la acreción y cierre de la cuenca de tipo Fore-Arc entre el Bloque Chocó y Suramérica, donde los tensores de la ASM demuestran una deformación microestructural no perceptible en afloramiento. De acuerdo con la localización de los tipos de fábricas, se propone dos zonas de deformación: una localizada en el sector Este de la Carretera, donde la dinámica de la Falla San Juan imparte una fábrica tectónica observada en las estaciones CB-04, CB-07, CB-11 (como ejemplo). Y una segunda zona de deformación, asociada al frente más proximal de los terrenos acrecionados, Zona Oeste de la carretera (sitios CB-19, CB-20, CB-21).

La orientación de la sección estudiada permite evaluar las condiciones estructurales locales, con la intención de saber por qué se presenta una alternancia en las fábricas a lo largo del transecto, a lo cual se propone sea debida al plegamiento de los estratos en respuesta a la acomodación y levantamiento de las rocas en el margen oriental de la Cordillera Occidental.

La dirección de acreción del Bloque Panamá-Chocó, es acorde a la deformación y configuración regional de las estructuras de deformación como pliegues y fallas, además de los tensores de deformación, donde la tendencia del eje máximo en una fábrica tipo 4 es perpendicular al eje de acortamiento.

Referencias

- Álvarez, E y González, H. (1978). *Geología y Geoquímica del Cuadrángulo I-7 (Urrao). Escala 1:100.000. Ingeominas, Informe 1761*. Medellín: Ingeominas, Informe 1761. 347pp.
- Álvarez, J. (1971). *Informe preliminar sobre geoquímica de la Cordillera Occidental*. Medellín: Ingeominas. Informe interno (inédito).
- Aubourg, C., Smith, B., Bakhtari, K., Guya, N., Eshragi, A., Lallemand, S., . . . Delaunay, S. (2004). Post-Miocene shortening pictured by magnetic fabric across the Zagros-Makran syntaxix (Iran). In: Sussman, A.J., Weil, A.B. (Eds.), *Orogenic Curvatura: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses*. Boulder, Colorado. *Geological Society of America Special Papers. Vol 383. 17-40pp*.
- Barrero, D. (1979). Geology of the Central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas. Vol 4. 1-75pp. Bogotá*.
- Borradaile, G. (1988). Magnetic susceptibility, petrofabric and strain. *Tectonophysics. Vol 156. 1-20pp*.
- Borradaile, G. J y Jackson, M. (2010). Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *Journal of Structural Geology 32. 1519-155pp*.
- Botero, G. (1975). Edades radiométricas de algunos plutones colombianos. *Revista Minería. Vol 27. No169-179. 8336-8342pp. Medellín*.
- Caballero, C. I. (2011). *La fábrica Magnética a partir de La Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y dinámicas de flujo*. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
- Calle, B y Salinas, R. (1986). *Geología y Geoquímica de la Plancha 165, Carmen de Atrato*. Medellín: Ingeominas, Informe 1987. 140pp.
- Calle, B., González, H., De La Peña, R., Escorce, E., Durango, J., y Otros, y. (1983). *Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar Plancha 166 Jericó Escala 1: 100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Case, J. E., Duran, S., López, R. A., y More, W. R. (1971). Tectonics investigations in Western Colombia and eastern Panama. *Geological Society America Bulletin. Vol. 82. 2895-2903pp*.
- Chadima, M., Hroudá, F., y Melichar, R. (2006). Magnetic fabric study of the SE Rhenohercynian Zone (Bohemian Massif): implications for dynamics of the Paleozoic accretionary wedge. *Tectonophysics. Vol 418 (1-2). 93-109pp*.
- Chicangana, G. (2005). The Romeral fault system: a shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in Northwestern South America. *Earth Science Research. Vol 9 No 1. 51-66pp*.
- Cifelli, F., Mattei, M., Chadima, M., Hirt, A., y Hansen, A. (2005). The origin of tectonic lineation in extensional basins: Combined neutron texture and magnetic analyses on "undeformed" clays. *Earth Planetary Science Letters. Vol 235 (1-2). 62-78pp*.

- Cossio, U. (1994). Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Chocó, Geología, Recursos Minerales y Amenazas Geológicas, Memoria Explicativa . *Ingeominas, Bogotá*.
- Díaz, J. S. (2015). *Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco, y su significado en la formación de un domo marginal a las Fallas de Romeral*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. Bogotá, Colombia Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.
- Dinarès, J y Parés, J. (1992). Determinación de fábrica mediante la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en rocas con diferente grado de deformación. Ejemplo de materiales eocenos de la cuenca de Ainsa (Pirineo Central) . *Geogaceta*. Vol 12.
- Dinarès-Turell, J., McClelland, E., y Santanach, P. (1991). Significado de la Fábrica Magnética de algunas rocas sedimentarias de las unidades sudpirenaicas. *Sociedad Geológica de España*. Vol 4 (1-2).
- Duque-Caro, H. (1990). The choco block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*. 2-3pp.
- Ellwood, B. B., Hrouda, F., y Wagner, J. (1988). Symposia on magnetic fabrics: introductory comments. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Vol 51 (4). 249-252pp.
- Gómez, E. (2001). Tectonic controls on the late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia. *Cornell university. PhD thesis*. Vol 1. 616pp. New York.
- Gómez, J., Nivia, A., Montes, N. E., Tejada, M. L., Jiménez, D. M., Sepúlveda, J., . . . Uribe, H. (2007). *Mapa Geológico de Colombia escala 1:2'800.000*. Bogotá: Ingeominas.
- González, H. (1977). Conceptos de metamorfismo dinámico y su aplicación a la zona de falla de Romeral . *Boletín Ciencias de la Tierra*, Vol 2, 81-106p.
- González, H. (2001). *Mapa geológico del Departamento de Antioquia, Geología, Recursos minerales y Amenazas potenciales, Escala 1:400000, Memoria Explicativa* . Bogotá, Colombia: Ingeominas.
- González, H y Londoño, A. C. (2003). *Geología de las planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao. Escala 1:100.000. Memoria explicativa* . Bogotá: Ingeominas. 119pp.
- González, J. L., Shen, Z., y Mauz, B. (2014). New constraints on Holocene uplift rates for the Baudo Mountain. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol 52. 194-202pp.
- Graham, J. (1966). Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks. In: Steinhart, J.S., Smith, T.J. (Eds.), *The Earth Beneath the Continents. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series*. Vol. 10. 627-648 pp.
- Graham, J. W. (1954). Magnetic susceptibility anisotropy: an unexploited petrofabric element . *Geological Society of America*. Vol 65. 1257-1258pp.

- Grosse, E. (1926). *Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el Río Arma y Sacaojal*. Berlín. Alemania: Dietrich Reimer. 361pp.
- Hongn, F., Aranguren, A., Tubía, J., y Mon, R. (1999). Estructura, fábrica y emplazamiento de los granitos de Brealito y La Playa, basamento del Valle Calchaquí, Salta, Argentina. *Acta Geológica Hispánica. Vol 34 (2-3). 301-317pp.*
- Hrouda, F. (1982). Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysics Surveys. Vol 5 (1). 37-82 pp.*
- Jackson, M y Tauxe, L. (1991). Anisotropy of magnetic susceptibility and remanence: Developments in the characterization of tectonic, sedimentary, and igneous fabric. *Reviews of Geophysics, Vol 29. 371-376p.*
- Jackson, M y Tauxe, L. (1991). Anisotropy of magnetic susceptibility and remanence: Developments in the characterization of tectonic, sedimentary, and igneous fabric. *Reviews of Geophysics. Vol 29. 371-376pp.*
- Jelinek, V. (1977). The Statistical Theory of Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Rocks and Its Application. *Geophysika. 88pp.*
- Jelinek, V. (1978). Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodaetica. Vol 22 (1). 50-62pp.*
- Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics. Vol 79 (3-4). 63-67pp.*
- Kammer, A. (1993). Las Fallas de Romeral y su Relación con la Tectónica de la Cordillera Central . *Geología Colombiana. Vol 18. 27-46pp. Bogotá.*
- Kellogg, J., Ogujiofor, I. J., y Kansakar, D. R. (1985). *Cenozoic tectonics of Panama and North Andes Blocks* . Bogotá. Colombia: IV Congreso Latinoamericano de Geología. Vol 42 – 49.
- Kerr, A. C., Marriner, G., Tarney, J., Nivia, A., Saunders, A. D., Thirlwall, M. F., y Sinton, C. W. (1997). Cretaceous basaltic terranes in western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology. Vol. 38(6).*
- Maffione, M., Hernandez-Moreno, C., Ghiglione, M. C., Speranza, F., van Hinsbergen, D. J., y Emanuele, L. (2015). Constraints on deformation of the Southern Andes since the Cretaceous from anisotropy of magnetic susceptibility. *Tectonophysics. Vol 665. 236-250pp.*
- Mejía, M y Salazar, G. (1989 (publicado 2007)). *Memoria explicativa de la Geología de la Plancha 114 (Dabeiba) y parte W de la 115 (Toledo). Escala 1:100.000* . Medellín: Ingeominas. 111pp.
- Nagata, T. (1961). *Rock Magnetism. Second edition*. Tokyo, Japan: Maruzen.
- Parés, J., Van der Pluijm, B., y Dinarès-Turell, J. (1999). Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics. Vol 307 (1-2). 1-14pp.* .

- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*. Vol 86 No B11. 10753 – 10770pp.
- Ramírez, M. J. (2012). *Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (Asm) del Miembro Superior de la Formación Amagá, Sección Quebrada Sabaleticas, Suroccidente Antioqueño*. Medellín : Universidad EAFIT. Departamento de Ciencias de la Tierra.
- Robion, P., Grelaud, S., y de Lamotte, D. (2007). Pre-folding magnetic fabrics in fold-and-thrust belts: Why the apparent internal deformation of the sedimentary rocks from the Minervois basin (NE–Pyrenees, France) is so high compared to the Potwar basin (SW-Himalaya, Pakistan)? *Sedimentary Geology*, Vol 196. 181-200pp.
- Rodríguez, G y Arango, M. S. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y Diabasas de San José De Urama: Un prisma acrecionario T-Morb en el Segmento Norte De La Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín Ciencias de la Tierra*. Nro. 33. 17-38 pp.
- Rodríguez, G y Zapata, G. (2012). Características del plutonismo Mioceno superior en el Segmento Norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. No 31, 5-2pp.
- Salazar, G., James, M., y Tistl, M. (1991). *El Complejo Santa Cecilia – La Equis: Evolución y acreción de un arco magmático en el norte de la Cordillera Occidental, Colombia*. Manizales: Simposio de Magmatismo Andino y su Marco Tectónico. Memorias tomo II. 142–160pp.
- Soto, R., Larrasoaña, J., Arlegui, L., Beamud, E., Oliva-Urcia, B., y Simón, J. (2009). Reliability of magnetic fabric of weakly deformed mudrocks as a palaeostress indicator in compressive settings. *Journal of Structural Geology*. Vol 31 (5). 512–522pp.
- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., y Gorin, G. (2008). Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia . *Tectonophysics*. Vol 460. 134–157pp.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., . . . Rivera, C. (2000). Geodynamics of the Northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*. Vol 19. 787–813pp.
- Tarling, D y Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. London, Great Britain: Chapman & Hall.