

ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) DEL MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN AMAGÁ, SW ANTIOQUEÑO Y SUS IMPLICACIONES TECTÓNICAS

Jackeline Ramírez¹, Gloria M. Sierra¹, María Isabel Marín-Cerón¹

¹Universidad EAFIT, Departamento de Geología, Medellín, Colombia

RESUMEN

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) puede expresarse matemáticamente como un tensor de segundo orden y geométricamente como un elipsoide con ejes K1, K2, K3, que representan el eje máximo, medio y mínimo respectivamente. Las relaciones entre los ejes determinan los parámetros de ASM que a su vez indican la forma elipsoidal.

Los resultados de ASM en la sección de la quebrada Sabaleticas en el suroeste de Antioquia, pueden indicar al menos dos eventos de deformación en el Miembro Superior de la Formación Amagá. Estas deformaciones están en coherencia con las reportadas por otros autores a lo largo del sistema de fallas Cauca-Romeral. Desde un punto de vista global, los resultados de ASM están relacionados con la actividad del sistema Romeral largo de la falla Piedecuesta, a finales del Cenozoico.

Palabras Clave: Anisotropía de susceptibilidad magnética, Formación Amagá, tectonismo, Cenozoico.

ABSTRACT

The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) is a useful tool to determine the magnetic fabric and their deformation in sedimentary rocks. The AMS can be expressed mathematically as second order tensor and geometrically as an ellipsoid with K1, K2, K3 axes, which represent the maximum, medium and minimum axes respectively. The relationships between the axes determine the AMS parameters which in turns indicate the ellipsoid shape.

The AMS results obtained in the Sabaleticas stream section in the SW of Antioquia, may indicate at least two deformational events in the Upper member of the Amagá Formation. These deformations are in coherent with those reported by other authors along the Cauca-Romeral fault system. From a global point of view, the AMS results are related with the activity of the Romeral system along the Piedecuesta fault, during the late Cenozoic.

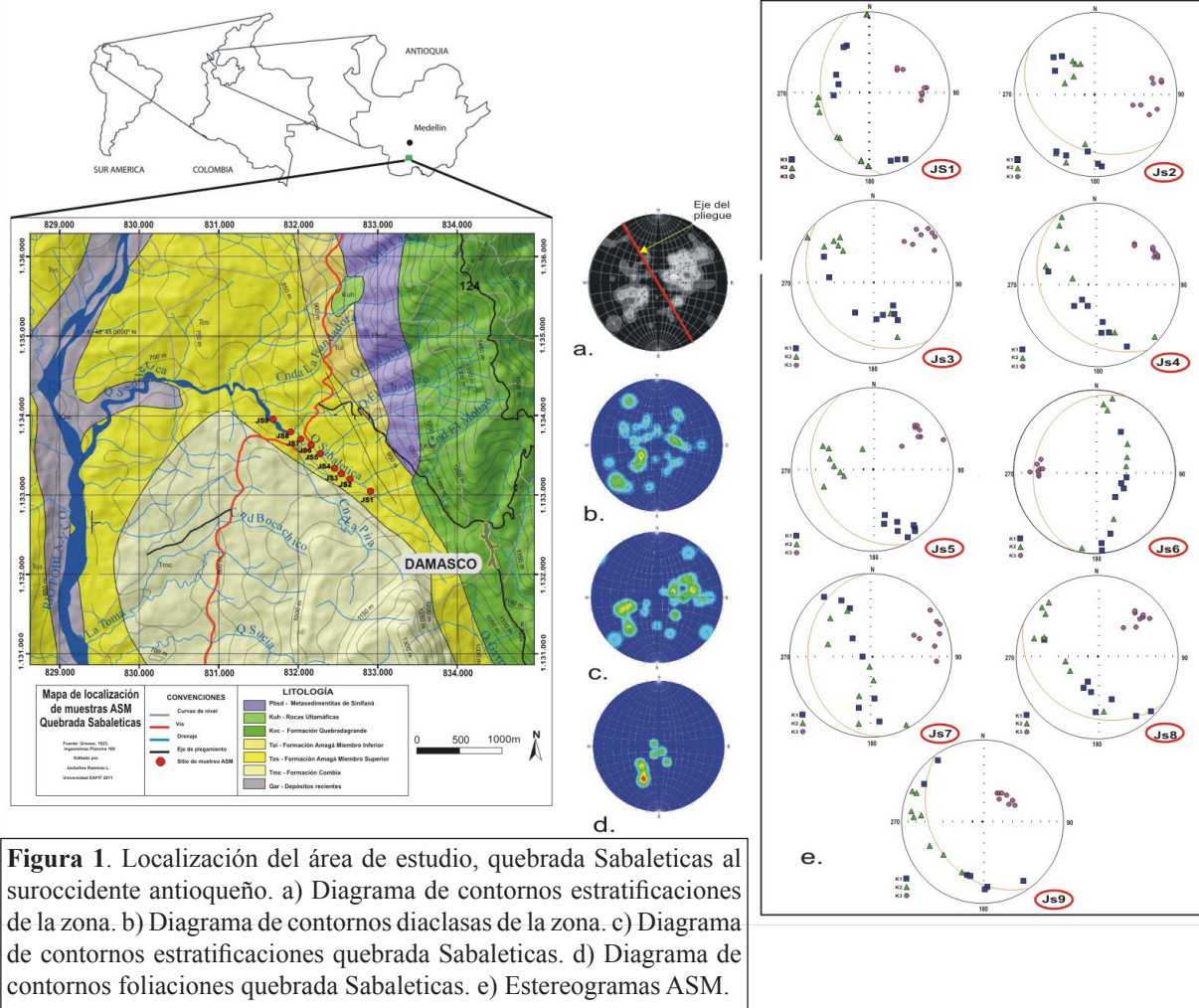
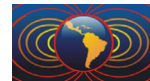
Keywords: Magnetic susceptibility anisotropy Anisotropic, Amagá Formation, tectonism, Cenozoic.

Introducción

La fábrica magnética refleja la orientación preferente de todos aquellos minerales que contribuyen a la susceptibilidad magnética, de modo que las variaciones en la orientación e intensidad de la fábrica magnética de las rocas quedan reflejadas como variaciones en la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM). La ASM se define como un tensor simétrico de segundo orden en el que la magnitud y orientación de sus principales direcciones (K1, K2, K3) depende de una compleja función de varios factores tales como la mineralogía, forma, tamaño, distribución y concentración del grano (Tarling y Hrouda, 1993). Gráficamente, la ASM se expresa mediante un elipsoide cuyo eje mayor magnético ($K_{max} = K1$) es paralelo a la lineación magnética y el eje corto del elipsoide ($K_{min} = K3$), es normal a la foliación magnética (Hrouda, 1982; Borradaile, 1988).

Las fábricas magnéticas primarias son aquellas adquiridas por las rocas sedimentarias durante su depositación. Eventos de deformación sobre las rocas modifican estas fábricas primarias causando lineaciones o fábricas tectónicas con las estructuras (Tarling and Hrouda, 1993).

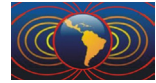
En el presente trabajo se estudia la fábrica magnética de las rocas a lo largo de la quebrada Sabaleticas. El área de estudio se encuentra localizada en el flanco Occidental de la cordillera Central, en el Suroccidente del departamento de Antioquia. La quebrada nace en el municipio de Damasco y corre hacia el noroeste para desembocar en el río Poblano (fig. 1).



Marco Geológico

1. En el límite Oligoceno – Mioceno, esfuerzos transtensionales dextrales del Sistema de fallas Romeral dieron lugar a varias cuencas *pull – apart* (e.g. Irrá, Amagá, Quinchia) a lo largo de la depresión del Cauca (Alfonso *et al.*, 1994; Sierra, 1994).
2. La acreción del Bloque Chocó comienza durante el Mioceno medio a lo largo de la cuenca del Atrato, deformando las formaciones pre – Miocénicas medias (Duque – Caro, 1990).
3. El esfuerzo compresivo asociado con la acreción del Bloque Chocó, deforma las cuencas *pull – apart* y genera una componente transpresional (López *et al.*, 2006).
4. En consecuencia a este régimen compresivo, el sentido de los esfuerzos dominantes se invierte durante el Plioceno – Pleistoceno, y se desarrolla un movimiento sinetral en el Sistema de fallas de Romeral (Sierra, 1994; MacDonald *et al.*, 1996). Esta inversión es confirmada por estudios paleomagnéticos (Magnetización Remanente Natural y ASM) realizados en algunos de los cuerpos intrusivos Terciarios localizados en el suroeste del departamento de Antioquia (Cerro Corcovado, Cerro Tusa, entre otros). Los resultados obtenidos permitieron determinar que dichos cuerpos habían sido rotados por la acción de las fallas de este sistema alrededor de ejes verticales (35° en sentido de las manecillas del reloj hace 8 Ma, y en contra de las manecillas del reloj) y ejes horizontales (~ 90°), estos últimos perpendiculares a la dirección de Romeral (MacDonald, 1980; MacDonald *et al.*, 1996).

El diagrama de contornos para las estratificaciones de la zona (Botero *et al.*, 2011) muestra la presencia



de plegamientos asimétricos con base en la disposición de los polos representados en la Figura 1a, con un eje en sentido NW-SE, coincidente con el tren de esfuerzos observados en las diaclasas (fig. 1b). Sin embargo, algunos datos estructurales de diaclasas sugieren otra dirección en sentido NE-SW que puede indicar un esfuerzo correspondiente a otro evento deformacional. La Figura 1c muestra la tendencia de las estratificaciones de la quebrada Sabaleticas en un marcado sentido NE-SW, de igual manera la representación de las foliaciones muestran una direccionalidad en sentido SW (fig. 1d).

Varios autores subdividen la Formación Amagá en dos Miembros cada uno con dos unidades (Miembro Superior – Unidad 1 y 2; Miembro Inferior – Unidad 3 y 4) de acuerdo con las asociaciones de facies y características petrográficas. El tipo de roca predominante son las limolitas, litoarenitas feldespáticas y las vacas líticas (Sierra *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2008).

Algunos estudios de ASM realizados en la Formación Amagá para el Miembro Inferior han sido realizados por Sierra and Marín-Cerón (2011). La fábrica magnética reportada en este estudio representa principalmente

una fábrica deformada asociada con plegamiento y fallamiento, concluye entre otros aspectos, que los elipsoides de los sedimentos del Miembro Inferior presentan forma prolada, indicando fases de deformación (Sierra y Marín-Cerón., 2011).

La Figura 2 presenta la columna de la quebrada Sabaleticas (Miembro Superior).

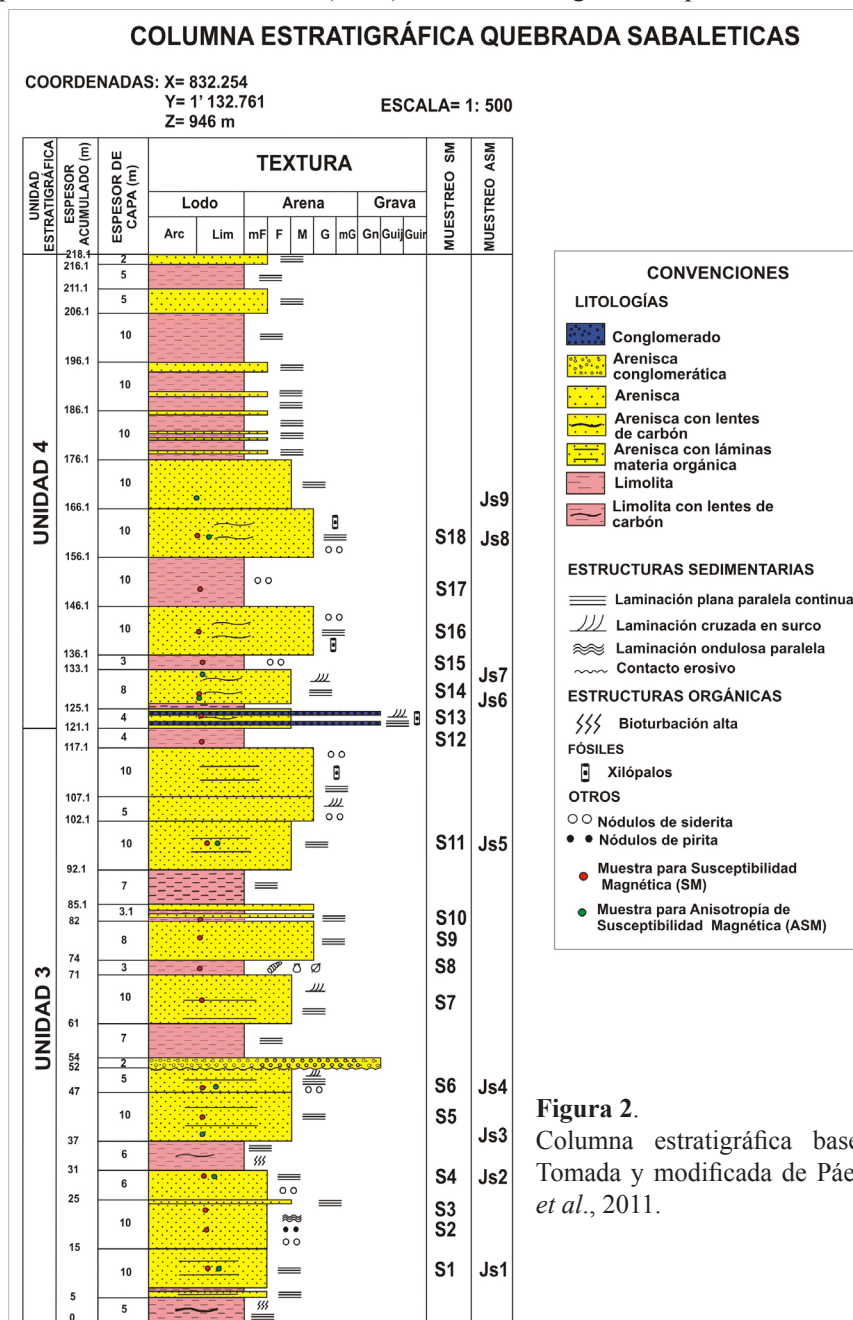
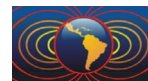


Figura 2.

Columna estratigráfica base. Tomada y modificada de Páez *et al.*, 2011.



Muestreo y Metodología

El muestreo para el estudio de ASM se realizó en nueve sitios a lo largo de la quebrada Sabaleticas (cinco en la Unidad 3 y cuatro en la Unidad 4), se extrajeron seis núcleos en cada afloramiento utilizando una perforadora portátil que funciona mediante un motor a gasolina, con broca de punta de diamante de 2.5 cm de diámetro. Cada núcleo se perforó a una profundidad de al menos 6 cm. De cada núcleo se obtuvieron especímenes con alturas de 2.5 cm. Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT, en un equipo Kappabridge MFK1-FB con una frecuencia de operación de 976 Hz y un campo magnético de baja intensidad (200 Am^{-1}), basado en la medida de las susceptibilidades a lo largo de quince (15) direcciones preestablecida (Jelinek, 1981). Para el análisis de la susceptibilidad magnética se usaron 20 g de cada muestra de roca (en sedimento) de dieciocho sitios de la quebrada Sabaleticas. La Figura 2 presenta los puntos de muestreo a lo largo de la columna estratigráfica de la quebrada. Los parámetros de la anisotropía de susceptibilidad magnética (Jelinek 1981; Hrouda, 1982), están dados por:

- Susceptibilidad magnética promedio, $K_m = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$.
 - Grado de anisotropía, P' ó $P_j = \exp [2(\eta_1 - \eta)^2 + (\eta_2 - \eta)^2 + (\eta_3 - \eta)^2]^{1/2}$, donde: $\eta_1 = \ln K_1$; $\eta_2 = \ln K_2$; $\eta_3 = \ln K_3$; $\eta = \ln(K_1 + K_2 + K_3) / 3$.
 - Parámetro de forma, $T = [2 \ln(K_2 / K_3) / \ln(K_1 / K_2)] - 1$. T define la simetría de la fábrica magnética o la forma de la trama mineral ($-1 \leq T \leq +1$). Si $T \leq 0$ la forma de elipsoide magnético es alargada (prolado) indicando fábrica linear; si $T \geq 0$, el elipsoide magnético tiene forma achatada (oblado o planar).
- Para Dinarès-Turell *et al.*, (1991) cuando $K_{\max} \approx K_{\text{int}} \gg K_{\min}$ el elipsoide tiene forma aplastada y la fábrica magnética define una foliación magnética con $K_{\min}$ perpendicular a ésta (definida por el plano que contiene $K_{\max}$ y $K_{\min}$). En el caso en que $K_{\max} \gg \gg K_{\text{int}}$ el elipsoide es de tipo alargado y se habla de lineación magnética.
- Lineación magnética, $L = K_1 / K_2$.
 - Foliación magnética, $F = K_2 / K_3$.

Resultados y Análisis

Fábrica magnética

De acuerdo a los estereogramas obtenidos (fig. 1), en forma general, la falta de concentración de los K3 hacia el centro, elimina una posible consideración de fábrica magnética de tipo depositacional. Se presenta una distribución de los K1 en forma de guirnalda con respecto al eje NS (JS6, JS7) y una tendencia de los K3 a estar concentrados.

Las fábricas magnéticas de las estaciones pertenecientes a la Unidad 3 presentan las siguientes tendencias: la estación JS1 se caracteriza por mostrar una foliación magnética (relativo buen agrupamiento de los K3 y dispersión los K1 y K2). La dirección del K1 está en sentido NW-SE. Para la estación JS2 se aprecia una guirnalda de los K1 con dirección NW-S. La estación JS3 presenta también la guirnalda de K1 con dirección NW-SE y una excelente concentración de K3 al NE.

Para la estación JS4, se observa la misma tendencia de la estación anterior con una marcada concentración de K3 al NE. La estación JS5 muestra una concentración neta de los K1 hacia el SE y de los K3 en el NE.

Para la Unidad 4 las fábricas magnéticas, se presentan de la siguiente manera: la estación JS6 muestra una guirnalda con los K1 y una excelente concentración de los K3 perpendicular a la guirnalda. La estación JS7 presenta una guirnalda de K1 en dirección NW-S y una concentración de K3 hacia el NE. La estación JS8 con una concentración de K3 hacia el NE, una dirección de los K1 hacia el SE. La estación JS9 continúa con el buen agrupamiento del K3 al NE y una tendencia de los K1 NW-SE.

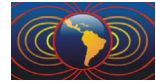
Parámetros escalares ASM

Los parámetros de anisotropía de susceptibilidad magnética para cada estación se muestran en la Tabla 1.

Conclusiones

Anisotropía de Susceptibilidad Magnética

La ASM presente en la quebrada Sabaleticas es alta, los grados de anisotropía varían entre valores medios y altos (entre el 7% y el 42%) lo que evidencia una fábrica magnética super-impuesta sobre la fábrica sedimentaria, asociada posiblemente a procesos deformacionales de origen tectónicos.

**Tabla 1.** Valores para cada estación muestreada de los distintos parámetros de ASM.

Estación	N	K ₁	K ₂	K ₃	Km	L	F	Pj	T
JS1	8	1.042	1.033	0.025	4.10	1.010	1.116	1.142	0.842
JS2	8	1.028	1.015	0.957	9.72	1.012	1.062	1.080	0.656
JS3	8	1.031	1.009	0.960	0.195	1.022	1.051	1.070	0.401
JS4	8	1.083	1.065	0.852	0.289	1.017	1.249	1.307	0.856
JS5	8	1.039	1.009	0.952	7.24	1.030	1.060	1.094	0.325
JS6	8	1.101	1.093	0.806	0.303	1.007	1.355	1.426	0.953
JS7	8	1.078	1.069	0.853	0.146	1.009	1.252	1.303	0.924
JS8	8	1.029	1.015	0.956	5.33	1.014	1.062	1.082	0.629
JS9	8	1.042	1.034	0.924	3.35	1.008	1.119	1.145	0.866

N=Número de especímenes; K₁, K₂, K₃ eje máximo, intermedio y mínimo respectivamente del elipsoide de anisotropía; Km=susceptibilidad media ($\times 10^{-3}$ SI); L = lineación magnética; F = foliación magnética; Pj = grado de anisotropía; T = simetría de la forma.

La forma oblada de los elipsoides de deformación corrobora la anterior consideración. Así mismo la relación entre los ejes principales del elipsoide (K₁, K₂, K₃) permite ver un dominio de la foliación magnética sobre la lineación (dispersión de los K₁ y K₂ y una buena concentración de K₃). En general los K₃ se presentan perpendiculares al plano de estratificación, excepto en la estación JS6 de la Unidad 4, donde K₃ está ubicado paralelamente, debido a que este sitio de muestreo se encuentra sobre la zona de pliegue.

Los diagramas L vs. F (fig. 3), dominio prolado para las Unidades 1 y 2 del Miembro Inferior y oblatos, para las Unidades 3 y 4 del Miembro Superior, permiten determinar la existencia de por lo menos dos estancias deformaciones afectando las rocas de la Formación Amagá.

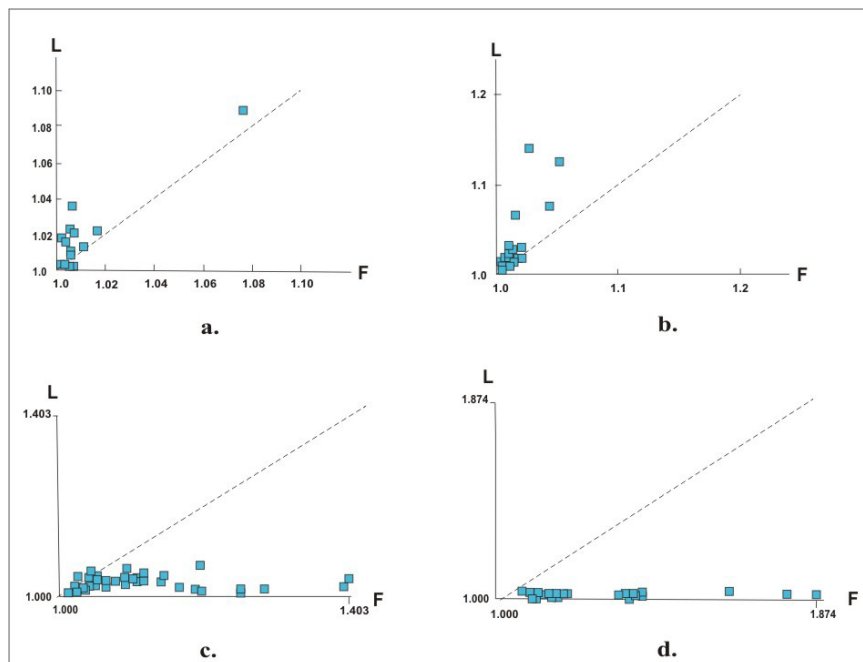
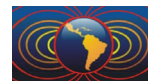


Figura 3. Diagramas de relación L vs. F para el Miembro Inferior y Superior de la Formación Amagá.
a) Unidad 1-Miembro Inferior.
b) Unidad 2-Miembro Inferior.
c) Unidad 3-Miembro Superior.
d) Unidad 4-Miembro Superior

Los procesos que incidieron en la deformación para el Miembro Superior de la Formación Amagá se pueden estructurar a partir de las siguientes consideraciones:

Eoceno (?) Oligoceno – Mioceno. Se presentan esfuerzos transtensionales dextrales del sistema de fallas Romeral. Se desarrollan fallas normales con tendencia NE-SW (Sierra y Marín-Cerón, 2011). Se deposita el Miembro Inferior de la Formación Amagá.

Mioceno medio – Mioceno tardío. Subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramericana. Se genera un desplazamiento lateral izquierdo. La cuenca Amagá es confinada, acompañada de estructuras compresivas que originan pliegues y fallas de cabalgamiento en sentido NE (Sierra y Marín-Cerón, 2011). Se deposita



el Miembro Superior de la Formación Amagá. Durante este tiempo se desarrolla un sistema de fallas con dirección NW-SE que controla el trayecto del río Cauca afectando las rocas de la Formación Amagá (Sierra y Marín-Cerón, 2011).

Mioceno tardío – Plioceno. Como consecuencia de este régimen compresivo, el sentido de los esfuerzos dominantes se invierten, se desarrollan movimientos sinextrales en el sistema de fallas de Romeral. Los sedimentos del Miembro Inferior y Superior de la Formación Amagá son rotados (Sierra y Marín-Cerón, 2011).

Referencias

- Alfonso, C., Sacks, P., Secor, D., Rine, J., and Pérez, V., 1994. A Tertiary fold thrust belt in the Valle del Cauca Basin, Colombia Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 7 (3-4), 387 - 402.
- Borradaile, G. J., 1988, Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156, 1 - 20.
- Botero, A., Carrera, D., Gómez, A., Londoño, C., Mesa, J., Quintero, J. D., Reyes, M., 2011, Aporte al conocimiento estratigráfico-estructural de la Formación Amagá, sección Cerro Amarillo – Quebrada Sabaleticas, Suroccidente Antioqueño. Informe Campo II, Universidad EAFIT, Medellín, 24 p.
- Dinarès-Turell, J., McClelland, E., Santanach, P., 1991. Significado de la fábrica magnética de algunas rocas sedimentarias de las Unidades sudpirenaicas. *Revista: Sociedad Geológica de España*, 4, 179 - 186.
- Duque-Caro, H., 1990. El Bloque Chocó en el Noroccidente Suramericano: Implicaciones Estructurales, Tectonoestratigráficas y Paleogeográficas. *Boletín Geológico de Ingeominas*, 31 (1), 47 -71.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Survey*, 5, 37 - 82.
- Jelínek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63 - 78.
- López, A., Ramírez, D., y Sierra, G. M., 2006. Vulcanismo Neógeno en el Suroccidente antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 19, 27 - 42.
- MacDonald, W. D., 1980. Anomalous paleomagnetic directions in Late Tertiary andesitic intrusions of the Cauca Depression, Colombian Andes. *Tectonophysics*, 28, 339 -348.
- MacDonald, W. D., Estrada, J. J., Sierra, G. M., and González, H., 1996. Late Cenozoic tectonics and paleomagnetism of North Cauca Basin intrusions, Colombia Andes: Dual rotation modes. *Tectonophysics*, 261, 277 - 289.
- Páez, L., M. I. Marín-Cerón y G.M. Sierra, 2011. Reconstrucción estratigráfica del Miembro Superior de la Formación Amagá en los sectores de La Pintada y Valparaíso (Cuenca Amagá, Andes noroccidentales). *Memorias XIII Congreso Colombiano de Geología y XIV Congreso Latinoamericano de Geología*, 285 p.
- Sierra, G. M., 1994, Structural and Sedimentary Evolution of the Irra Basin, Northern Colombia Andes. Tesis de Maestría Binghamton University. New York, 102 p.
- Sierra, G. M., Silva, J.C., y Correa, L.G., 2003. Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15, 9 - 22.
- Sierra, G. M. and Marín-Cerón, M. I., 2011. Amagá, Cauca Patía Basin. In *Petroleum Geology of Colombia*. Editor. Fabio Cediél. Vol (2) Fondo Editorial Universidad EAFIT. 104 p.
- Silva, J. C., Sierra, G. M., and Corre, L. G., 2008. Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 369 - 382.
- Tarling, D. H, and Hrouda, F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman and Hall, London, 217 p.