

MOVILIDAD GEOQUÍMICA ASOCIADA A ZONAS DE CIZALLA: SECTOR NO DE SANTA FÉ DE ANTIOQUIA, COLOMBIA

GEOCHEMICAL MOBILITY ASSOCIATED WITH SHEAR ZONES: SECTOR NW SANTA FE DE ANTIOQUIA, COLOMBIA

Gustavo Hincapié J.^(1,2), Luz Mary Toro T.^(1,3), César Augusto Ossa M.^(1,4),

¹ Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Departamento de Ciencias Geológicas. Calle 65 26-10 Manizales, Colombia.

²gustavo.hincapie@ucaldas.edu.co, ³luz.toro@ucaldas.edu.co, ⁴ceossa@ucaldas.edu.co

Hincapié J., G.; Toro T., L. M.; Ossa M., C. A. (2013). *Movilidad geoquímica asociada a zonas de cizalla: sector NO de Santa Fé de Antioquia, Colombia*. GEOLOGIA COLOMBIANA, Vol. 38. Bogotá, Colombia. pp. 33-42.

Manuscrito recibido: 15 de febrero de 2012; aceptado: 29 de mayo de 2013

Resumen

Una faja de cizalla dúctil afectó a las que hacen parte de la Granulita de Pantanillo y los Gabros del Batolito de Sabanalarga, localizada al NO del municipio Santa Fe de Antioquia, cordillera occidental de Colombia. El análisis cinemático de la faja indica que está constituida por movimientos transcurrentes dextrales con componente normal y zonas de cizalla que corresponden a movimientos inversos con componente dextral

En las zonas de cizalla la milonitización operó en un sistema abierto provocando movilización de TiO₂, SiO₂, CaO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, MnO y MgO; las pérdidas en Mg, Mn, Fe, Na y Ca están relacionadas con la destrucción de piroxenos y el incremento en pérdidas por calcinación se debe al aumento en formación de minerales hidratados como anfíbol secundario.

Palabras Claves: Cizalla, Santa Fe de Antioquia, Milonitización.

Abstract

At the NW of Santa Fe de Antioquia, Colombian Western Cordillera, four ductile shears zones were defined. Thus affected The Granulite of Pantanillo (ZC1, ZC2 and CZ3) and Gabros of Santa Fe (ZC3 and ZC4). The ZC1 and ZC2 zones show dextral transcurrent movements, the ZC3 show dextral transcurrent movements with a normal component. The ZC4 zone shows inverse movement with a dextral component.

Shear zones in the mylonitization in an open system operated causing mobilization TiO₂, SiO₂, CaO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, MnO and MgO; losses Mg, Mn, Fe, Na and Ca, are related to the destruction of pyroxene and increased loss on ignition is due to increased formation of hydrated as secondary amphibole minerals.

Keywords: Shears, Santa Fe de Antioquia, Milonytization.

INTRODUCCIÓN

Las zonas de falla presentes en todos los niveles corticales representan potencialmente conductos de alta permeabi-

lidad por las que pueden circular más cantidad de fluidos comparado con la roca encajante. El flujo de fluidos se asocia comúnmente con transporte de material y considerables cambios de volumen y masa. Las propiedades de

flujo y la reología de las rocas de falla son ampliamente influenciadas por la variabilidad, relaciones espaciales y temporales de diferentes mecanismos de deformación que acomodan la deformación en zonas de cizalla (Kisters *et al.*, 2000).

La movilidad de elementos químicos en zonas de cizalla depende principalmente de la composición química, mineralógica y textural del protolito, así como también del régimen de deformación. La mayoría de zonas de cizalla se caracterizan por la presencia de fluidos durante la deformación, lo que incrementa el transporte en solución, microfracturamiento y recristalización y genera nuevas paragénesis minerales que reemplazan o se adicionan a la paragénesis mineral relicto (Castro de Machuca *et al.*, 2010).

La movilidad de los elementos químicos puede ser analizada mediante los diagramas Isoconos, los cuales constituyen una solución gráfica simple a la ecuación de Gresens. Estos diagramas constituyen un medio simple y efectivo para estimar cambios en masa o volumen o concentraciones en procesos que implican transferencia de masas.

El presente trabajo consistió en el análisis estructural de las rocas de falla y la movilidad geoquímica de algunos elementos (pérdidas y/o ganancias) asociados con la aparición o desaparición de algunas fases minerales en las rocas mediante el uso de diagramas Isoconos.

LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en la vía que conduce del municipio de Santa Fé de Antioquia al Urabá antioqueño, propiamente entre los sectores de las quebradas La Marisona y La Sopera (Figura 1), departamento de Antioquia. Las coordenadas geográficas del sitio de estudio son X= 1.135.458 y Y= 1.222.115.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se tomaron 16 muestras georeferenciadas y orientadas para los análisis petrográficos y geoquímicos; el corte analizado en cada caso es perpendicular a la foliación milonítica mesoscópica y paralelos a la lineación de alargamiento de minerales (secciones XZ del elipsoide de deformación de Simpson and Schmid, 1983). Los gráficos de los isoconos permiten

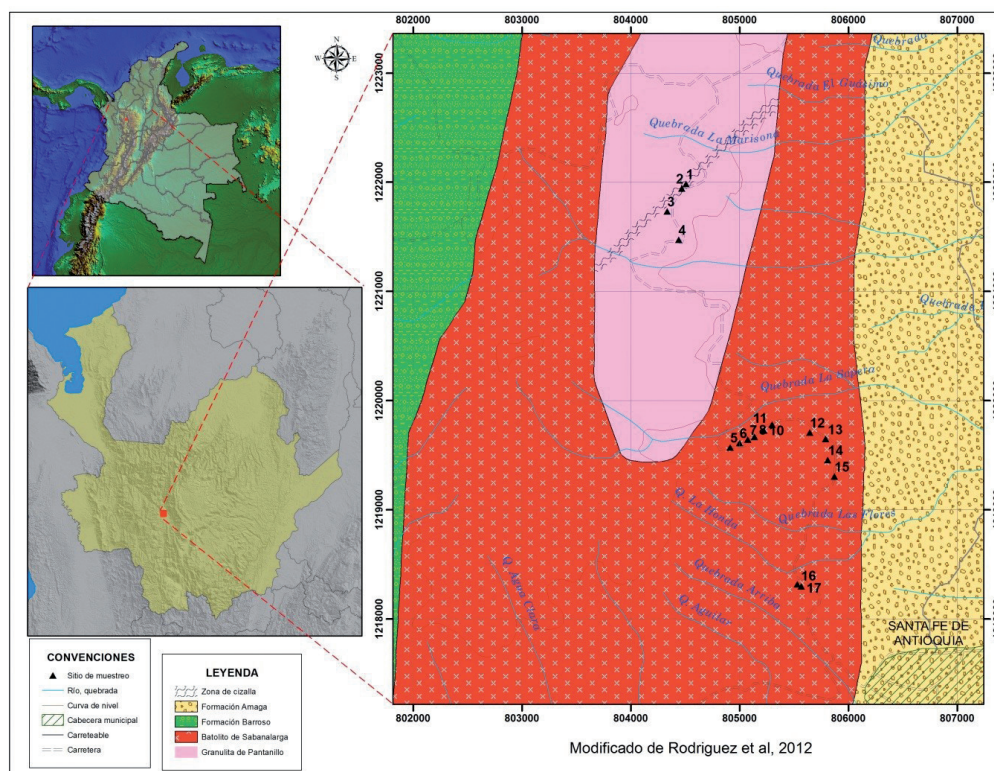


Figura 1. Mapa geológico generalizado del sector comprendido entre las quebradas La Marisona y La Honda, sitios de muestreo correspondiente.

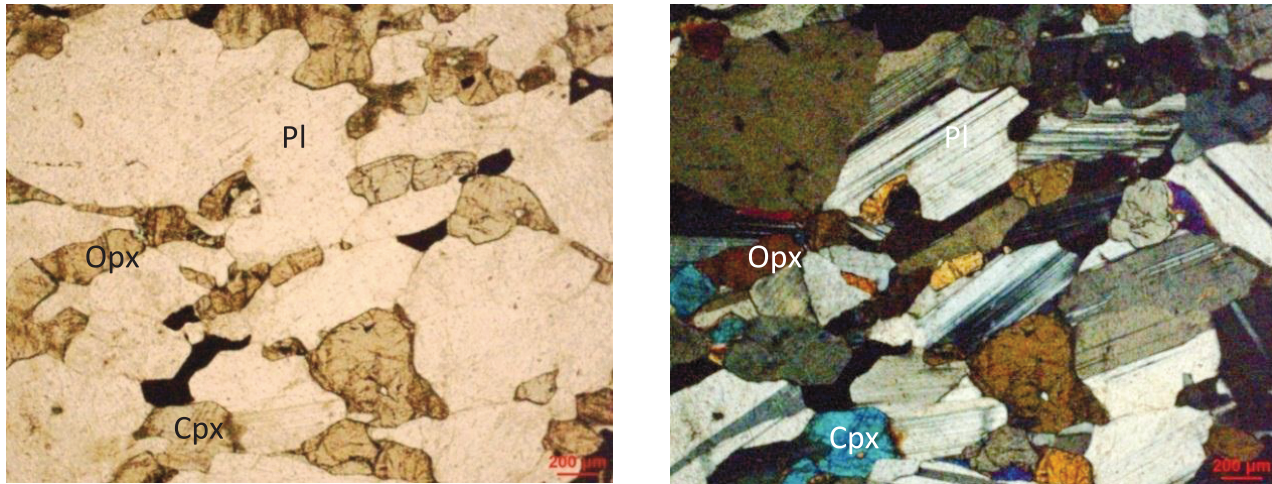


Figura 2. Textura granoblástica de la Granulita de Pantanillo definida por plagioclasa (Pl), ortopiroxenos (Opx), clinopiroxenos (Cpx), NNP -XPL.

evaluar cuantitativamente ganancias y pérdidas químicas en transferencia de masas (Grant, 1986, 2005). Para el balance de masas se utilizó la plantilla titulada “The_isocon_graphic_method_example.xls” donde se puede determinar las pérdidas y las ganancias durante la milonitización.

Los análisis químicos de roca total para elementos mayores y traza se realizaron en Acme Analytical Laboratories, Vancouver BC, Canadá, por medio de Espectrometría Secuencial de ICP en un espectrómetro de masas (ICP-MS). La precisión lograda por este procedimiento es de ± 2 y

± 5 para una concentración analítica entre 50 y 5 ppm, respectivamente.

GEOLOGÍA DEL ÁREA

La geología de la Cordillera Occidental de Colombia está representada fundamentalmente por afloramientos de rocas metamórficas correspondientes a la unidad litoestratigráfica denominada Granulitas de Pantanillo (Rodríguez *et al.*, 2012) y, el sector estudiado, por rocas ígneas intrusivas asociadas al Batolito de Sabanalarga

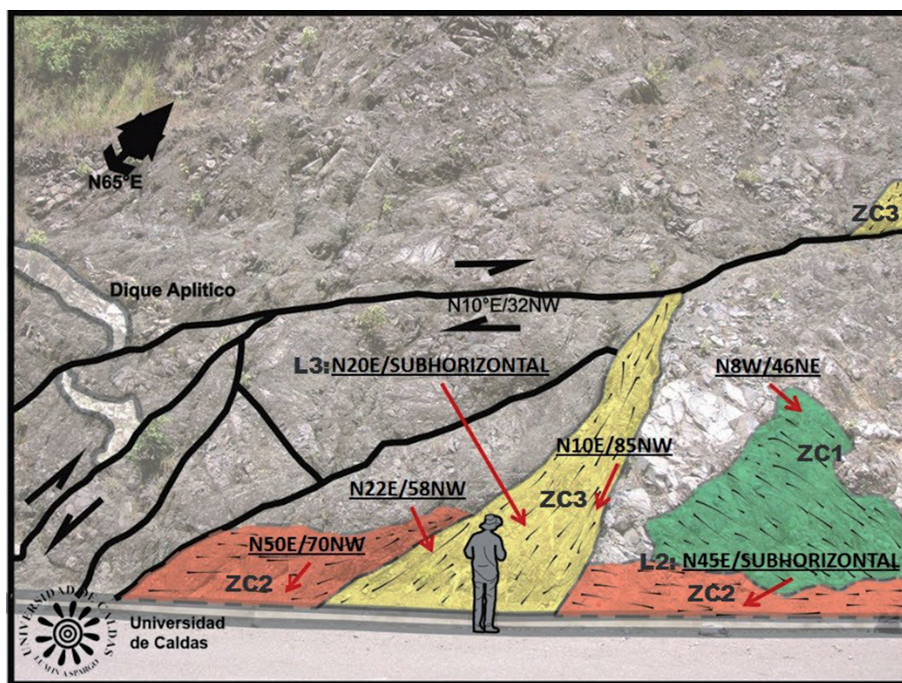


Figura 3. Relaciones de corte entre las zonas de cizalla ZC1, ZC2 y ZC3, L2 y L3: Lineación de alargamiento de minerales (tomado de Ardila y Melo, 2012).

(Gabros, Dioritas y Tonalitas) (Rodríguez *et al.*, 2012), (Figura 1).

Granulita de Pantanillo

Esta unidad macroscópicamente presenta bandeamientos por sectores que le imprimen una estructura gnéisica; dichas bandas corresponden a milonitas-ultramilonitas, con espesores de 0,5 mm a 2,0 m. La composición mineralógica de esta unidad comprende dos piroxenos, hipersteno y diópsido; la plagioclasa varía desde andesina hasta labradorita (An_{52} – An_{64}), anfíbol retrogrado (actinolita), epidota, cuarzo y clorita (Figura 2). Esta unidad a escala de afloramiento presenta localmente diques de composición félsica con espesores que alcanzan 1,7 a 2,1 cm; dichos diques son desplazados en orden de centímetros por sistemas de fallas (Figura 3). En esta unidad se observaron tres zonas de cizalla (ZC1, ZC2 y ZC3).

En las zonas de cizalla (Figuras 4 a, b) las rocas se caracterizan por una foliación milonítica, marcada por orientación preferencial de los piroxenos, anfíboles y plagioclasa y acentuada por masas irregulares de material titanífero. Es común encontrar en las milonitas y ultra-

milonitas bandas ricas en cuarzo, plagioclasa y epidota, recrystalizadas dinámicamente, y bandas ricas de micas de color verde y material titanífero. Las milonitas presentan foliación milonítica oblicua que indica cizalla dextral. Los porfiroclastos de plagioclasa, anfíbol y piroxenos con tamaños en el rango 0,05 mm – 0,1 mm desarrollan colas tipo σ , lo que indica cizalla dextral y extinción (Figuras 4 c, d). La cinemática de estas zonas de cizalla se resume en la (Tabla 1). A escala de afloramiento hay porfiroclastos de plagioclasa con colas, lo que permitió deducir que los movimientos fueron predominantemente dextrales.

La plagioclasa exhibe maclas de deformación e incipiente desarrollo de estructuras núcleo-manto.

El cuarzo se presenta en la matriz con tamaño de grano muy fino, muestra extinción ondulatoria de barrido y borde de grano; en algunos sectores se observa la formación de subgranos y el desarrollo incipiente de estructuras núcleo-manto.

La matriz es de color café oscuro a verde intenso, de tamaño de grano fino a muy fino, constituida por piroxenos, anfíboles, micas, plagioclasa y cuarzo.

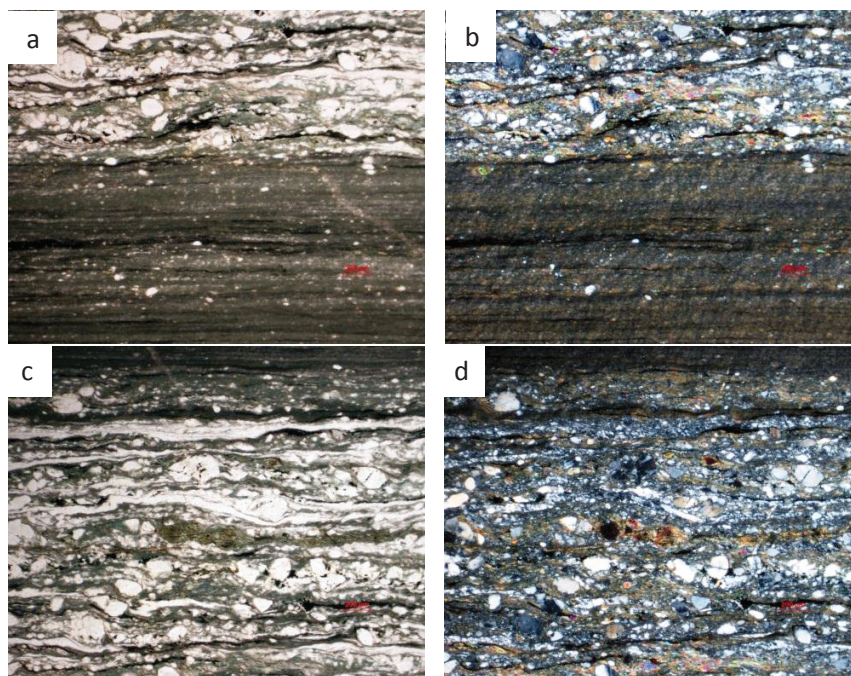


Figura 4. a, b. Microfotografías donde se observa el aspecto de las bandas de Ultramilonitas con Milonitas desarrollando porfiroclastos ovoides a subredondeados de anfíbol en una matriz recrystalizada de tamaño de grano muy fino en contacto con una banda de cuarzo recrystalizado. **4 c,d.** Detalle del desarrollo de superficies S-C y con porfiroclastos de cuarzo, plagioclasa y anfíbol que indican cizalla sinistral. PPL – XPL.

Tabla 1. Rangos de temperatura de deformación, según Trouw et al., (2010) para las zonas de cizalla (ZC1, ZC2 y ZC3) desarrolladas en la Granulita de Pantanillo y de las zonas de cizalla (ZC3 y ZC4) en los Gabros del Batolito de Sabanalarga.

Zona de cizalla	Cuarzo	Plagioclasa	Anfibol	Temperatura de deformación
ZC1*	Extinción ondulatoria de barrido. Migración de borde de grano (GBM)	Maclas de deformación. Extinción ondulatoria de barrido. Estructuras núcleo-manto	Extinción ondulatoria de barrido	Milonita de grado medio, temperatura entre 500 y 650 °C (Trouw, et al., 2010)
ZC2	Extinción ondulatoria de barrido. Subgranos. Estructuras núcleo-manto.	Maclas de deformación. Maclas flexionadas y microfalladas.	No presenta microestructuras que evidencien deformación plástica.	Milonita de bajo grado, temperatura entre 250 y 500 °C (Trouw, et al., 2010)
ZC3	Granos poligonales libres de deformación. Unos pocos granos muestran extinción ondulatoria.	Maclas de deformación. Extinción ondulatoria de barrido. Estructuras núcleo-manto	Extinción ondulatoria de barrido. Desarrollo de subgranos.	Milonita de grado medio, temperatura entre 500 y 650 °C (Trouw, et al., 2010)
ZC4	Granos poligonales libres de deformación.	Mirar secciones.	Extinción ondulatoria de barrido	Milonita de grado medio, temperatura entre 500 y 650 °C (Trouw, et al., 2010)

* Las venas de cuarzo son posteriores a la formación de la roca. Las microestructuras del anfíbol evidencian mayor temperatura de deformación que las microestructuras halladas en el cuarzo.

El comportamiento cristaloplástico del cuarzo, evidenciado por la recristalización dinámica, más el comportamiento frágil de la roca y la mineralogía de los minerales neoformados, indicarían condiciones a una temperatura de 250–500 °C, que corresponden a milonitas de bajo grado (Trouw et al., 2010).

Localmente, se encuentran bandas de cataclasis las cuales afectan tanto a la roca no deformada como a las bandas de milonita. La cataclasis evidencia la generación y distribución de fracturas y microfracturas transgranulares, intragranulares e intergranulares (Blenkinsop, 2000), las cuales dan origen de fallas y a su vez se presentan rellenas por clorita y epidota.

Hacia el oeste de la zona de estudio, se hallan varias fallas de cabalgamiento que afectan a todas las zonas de cizalla; los cabalgamientos se conectan hacia la parte superior formando un solo cabalgamiento. Los datos estructurales varían entre N10W y N30E en rumbo y tiene buzamientos intermedios hacia el oeste. La vergencia de estas estructuras es hacia el este.

Batolito de Sabanalarga

Se emplea este nombre para designar a un conjunto de rocas ígneas intrusivas de composición básica hasta in-

termedia que afloran al NO del municipio de Santa Fe de Antioquia (Figura 1). Estas rocas se caracterizan por presentar composiciones desde dioritas hornbléndicas y gabros hornbléndicos de color verde oscuro, con textura fanerítica, de grano medio a grueso, constituida por hornblenda, plagioclasa y menos cantidad por piroxenos. La mayoría de edades radiométricas reportadas para el Batolito de Sabanalarga están en el rango entre $89,9 \pm 0,8$ Ma (Ar–Ar) y $98,2 \pm 3,5$ Ma (K/Ar) (Rodríguez et al., 2012).

La zona de cizalla CZ4 se presenta hacia el límite oriental de las rocas gabroicas, su disposición promedio tiene rumbos NNE–SSW a NE–SW, con buzamientos a NE–SW, con buzamientos intermedios hacia el SE. Las rocas de falla corresponden a bandas de color verde claro, que corresponden a Ultramilonitas, y bandas de color verde intenso a casi negro, relacionadas a Milonitas con porfiroclastos de hornblenda y plagioclasa en una matriz con foliación milonítica. Las estructuras S–C y pescados de anfíbol se utilizaron para determinar la cinemática.

RESULTADOS DE LA MOVILIDAD GEOQUÍMICA

El análisis de movilidad geoquímica de elementos por pérdidas y/o ganancias de las rocas de falla relacionadas con la unidad litoestratigráfica de Granulita de Pantanillo, en las zonas de cizalla ZC2 y ZC3, muestra que los

Tabla 2. Análisis químicos de roca total para elementos mayores y trazas de la Granulita de Pantanillo por medio de ICP-MS.

Oxido (%)	SABA 01A	SAB 02A	SABA 02B	SABA 04	SABA 01E2	SABA 01E3	SABA 05	SABA 06	SABA 01E1	SABA 01F
Clasificación	Granulita	Granulita	Granulita	Granulita	Milonita	Milonita	Milonita	Milonita	Ultramilonita	Ultramilonita
X:	1222115	1222072	1222048	1221607	1222115	1222115	1219706	1219747	1222115	1222115
Y:	1135458	1135418	1135402	1135392	1135458	1135458	1135877	1135962	1135458	1135458
SiO ₂	53	51,01	46,58	53,95	50,53	68,5	53,58	54,4	53	63,99
Al ₂ O ₃	15,89	7,42	19,13	15,3	18,05	15,36	6,63	14,95	17,9	15,75
Fe ₂ O ₃	10,62	10,62	13,52	10,23	11,13	4,6	10,75	8,98	9,57	5,64
MgO	6,43	14	5,12	7,29	5,55	1,58	14,12	6,18	5,07	2,59
CaO	10,25	14,6	12,3	10,57	11,4	7,07	10,55	9,56	10,83	5,74
Na ₂ O	2,33	0,43	1,25	1,47	1,45	1,51	0,93	2,22	1,81	2,31
K ₂ O	0,02	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,25	0,54	0,14	0,61
TiO ₂	0,28	0,13	0,58	0,33	0,52	0,33	0,32	0,54	0,39	0,34
P ₂ O ₅	0,03	0,01	0,02	0,05	0,07	0,09	0,1	0,13	0,06	0,11
MnO	0,21	0,23	0,2	0,18	0,18	0,07	0,27	0,17	0,17	0,06
Cr ₂ O ₃	0,028	0,077	0,002	0,032	0,01	0,003	0,141	0,022	0,011	0,004
LOI	0,7	1,1	1,1	0,4	0,9	0,8	2	2,1	0,9	2,8
Total	99,788	99,637	99,812	99,812	99,87	99,923	99,641	99,792	99,851	99,944
Elemento (ppm)										
Ba	22	7	7	19	27	17	114	316	35	192
Co	33,9	59,9	37,1	38,4	34,7	11,3	39,7	29,8	31,5	19
Hf	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	1,0	0,2	1,3
Nb	0,5	0,2	0,3	0,2	0,4	0,8	0,3	1,0	0,2	1,2
Rb	0,2	0,5	0,2	0,1	1,0	0,2	3,9	5,3	1,3	15,9
Sr	213,6	80,6	221,3	187,5	216,8	187,8	66,9	449,3	226,6	246
Ta	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Th	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,2	2,8
V	173	166	463	222	243	113	328	336	223	129
Zr	5,6	7,6	2,9	5,4	5,3	2	11,6	37,5	4,4	35
Y	4,8	12,6	3,3	5,5	5,8	2	4,6	12,3	4,4	9,9
Sc	48	94	56	40	46	6	56	40	32	19
Ni	38	241	33	69	35	20	156	35	38	22
La	1,2	0,5	0,6	2,3	1,3	1,3	3,1	7,8	1,3	8,3
Ce	2,2	2,1	1,3	2,8	2,5	2,6	7	16,4	2,8	17,3
Pr	0,33	0,37	0,18	0,37	0,4	0,3	0,87	2,25	0,36	2,12
Nd	1,3	3,2	1,3	2,1	1,2	0,9	4,4	10,2	1,2	8
Sm	0,57	1,21	0,31	0,61	0,78	0,33	0,97	2,19	0,49	1,69
Eu	0,36	0,31	0,34	0,34	0,34	0,29	0,33	0,69	0,32	0,46
Gd	0,75	1,91	0,53	0,85	0,94	0,33	1	2,21	0,6	1,59
Tb	0,13	0,35	0,09	0,15	0,17	0,06	0,16	0,35	0,12	0,28
Dy	0,91	2,21	0,77	0,95	0,85	0,36	0,82	2,14	0,64	1,49
Ho	0,22	0,49	0,12	0,25	0,22	0,08	0,16	0,42	0,17	0,33
Er	0,66	1,33	0,39	0,84	0,65	0,16	0,52	1,31	0,5	1,11
Tm	0,08	0,23	0,06	0,09	0,1	0,03	0,09	0,19	0,07	0,19
Yb	0,62	1,24	0,35	0,62	0,71	0,18	0,47	1,21	0,57	1,2
Lu	0,11	0,21	0,07	0,1	0,12	0,03	0,08	0,24	0,08	0,19

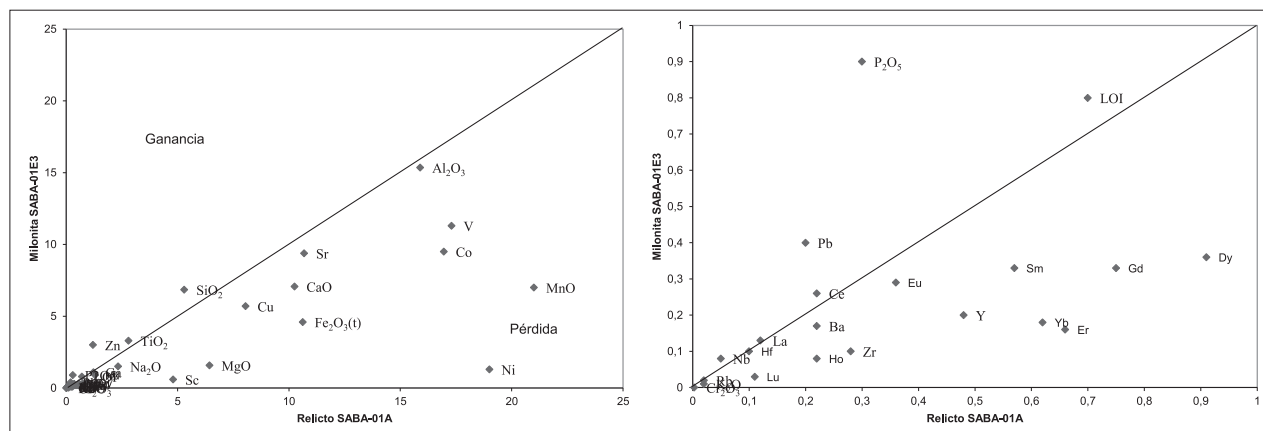


Figura 5. Diagramas Isóconos de la Granulita (SABA-01A) con respecto a la milonita de granulita (SABA-01E3). a) Óxidos mayores junto con elementos trazas. b). Detalle de la Isócona con escalas en X-Y de 1:1. Los factores de escalas utilizados fueron: x100 para MnO; x10 para TiO_2 , P_2O_5 ; x1 para Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , K_2O

cambios más importantes es el decrecimiento modal de los piroxenos (12 a 16 %), de plagioclasa (25 a 20 %) y un incremento gradual de anfíbol secundario (hasta 40 %) y cuarzo (hasta 20 %). Los porcentajes modales se obtuvieron por conteo de 800 puntos en cada sección delgada.

Para determinar la movilidad de los elementos durante los eventos de cizalla dúctil, se contó con los análisis químicos de roca total (Tabla 2), tanto en rocas no deformadas (protolito) como en milonitas-ultramilonitas; para tal fin, se elaboraron diagramas mediante el método Isocon (Grant, 1986) para las zonas de cizalla pertenecientes a ZC2 y ZC3, en los que se grafican los valores de elementos químicos del protolito contra los valores de las rocas miloníticas, lo que permite determinar la ganancia o la pérdida de elementos durante los procesos de milonitización. Para cada elemento se debe utilizar un factor de escala acorde con sus valores. La Figura 5 muestra los diagramas isóconos del protolito (Granulita, SABA-01A) contra una muestra (Milonita a partir de la Granulita) ubicada en la zona de cizalla ZC2 (SABA-01E3). En el gráfico se reflejan las ganancias en TiO_2 (≈ 18 %) y significativas en SiO_2 (≈ 29 %); y pérdidas significativas en CaO (≈ 31 %) y Na_2O (≈ 35 %), y pérdidas más drásticas en K_2O (≈ 50 %), Fe_2O_3 (≈ 56 %), MnO (≈ 66 %) y MgO (≈ 75 %).

El Al_2O_3 presenta comportamiento casi inmóvil durante la milonitización, con un irrelevante decrecimiento (≈ 3 %) comparado con la roca no deformada. La movilidad de los elementos es una función de la cantidad de dichos elementos en la roca no deformada (protolito) y de los minerales neoformados y recrystalizados; así que la pérdida de Mg, Mn, Fe, Na y Ca puede estar relacionada

con la destrucción de piroxenos durante la milonitización. Los altos valores en ganancia de H_2O (≈ 14 %) presentes en las muestras milonitizadas se debe posiblemente al incremento en la formación de neominerales hidratados tales como anfíbol.

Los elementos traza, incluyendo las tierras raras (REE), en su mayoría están empobrecidos, excepto para Nb y Ce. El decrecimiento en Ca y Sr (31 % y 20 %, respectivamente) refleja la destrucción parcial de la plagioclasa. Al comparar la composición del protolito (SABA-01A) con la roca de falla, la Ultramilonita a partir de la granulita (SABA-01F), se observan ganancias en SiO_2 (20 %) y en TiO_2 (21 %); pérdidas significativas en CaO (44 %), Fe_2O_3 (47 %); y drásticas en MgO (59 %) y MnO (71 %), mientras que el comportamiento de Al_2O_3 y Na_2O (0,9 %) representan pérdidas insignificantes considerándose como elementos inmóviles durante la deformación de dicha roca Ultramilonita (Figura 6).

En general, el comportamiento de los elementos de tierras raras (REE) muestra un ligero enriquecimiento en todos los elementos y los patrones paralelos al protolito (Granulita de Pantanillo), lo que sugiere una movilidad de dichos elementos en las zonas de cizalla, pero el comportamiento de estos no está relacionado con la intensidad de deformación en las rocas de falla (Milonitas-Ultramilonitas); además, los patrones de (REE) normalizados con respecto a condrita muestran una alta pendiente para la muestra (SABA-01F) que corresponde a la ultramilonita (Figura 7).

En términos generales, los cambios químicos observados son la remoción y adición de elementos que ocurren

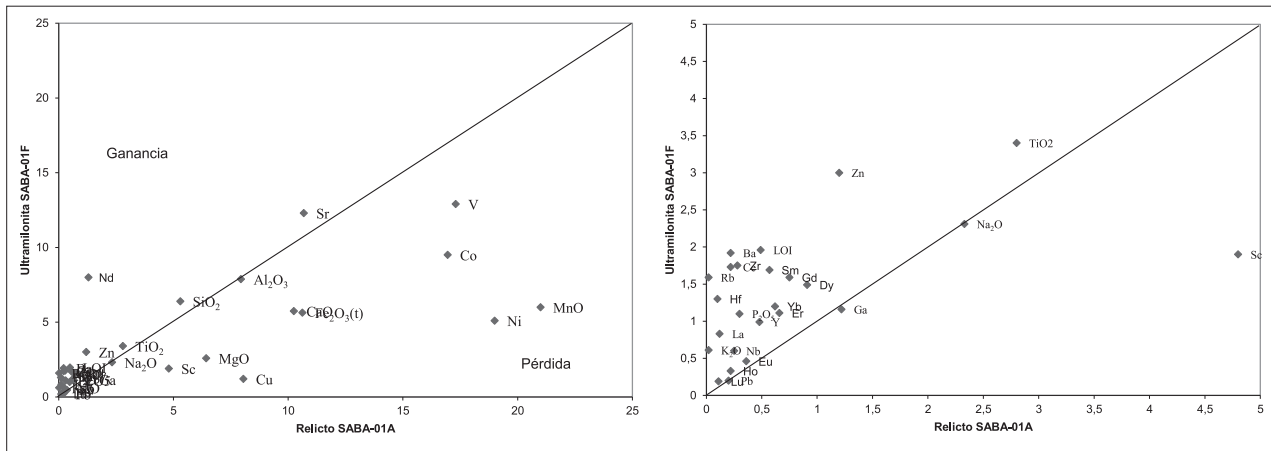


Figura 6. Diagrama Isócono entre la Granulita (SABA-01A) y la Ultramilonita de granulita (SABA-01F). a). Óxidos mayores junto con elementos trazas. b). Detalle de la Isócona con escalas en X-Y de 5:5

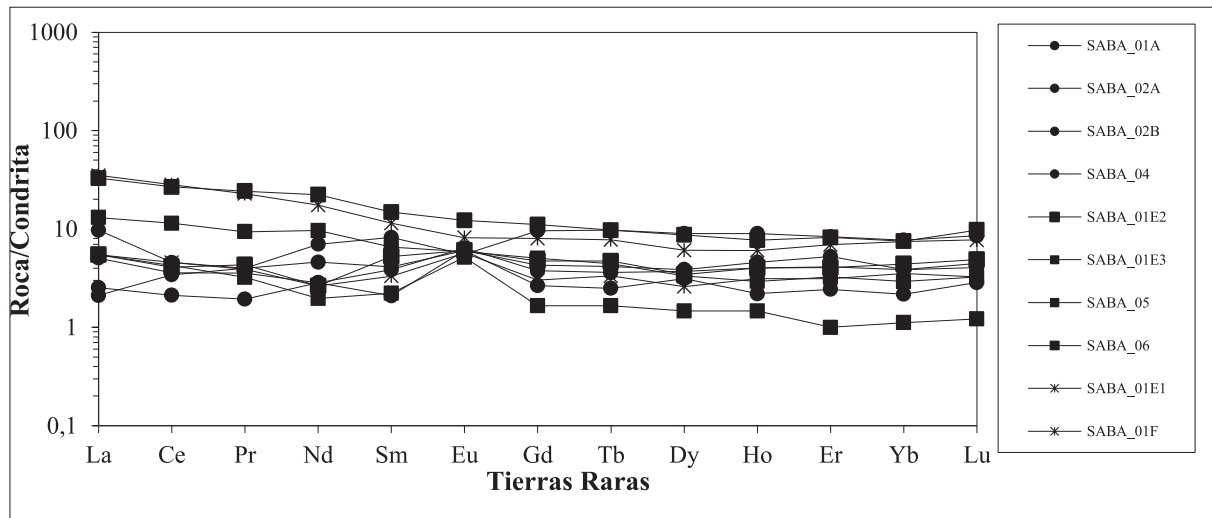


Figura 7. Diagrama de los REE de la Granulita de Pantanillo normalizados con respecto a Condrito según McDonough and Sun (1995). Los círculos corresponden al protolito, cuadrados a Milonitas, asteriscos a ultramilonitas.

debido a la interacción roca–fluido. La movilización de SiO_2 dentro de las zonas de cizalla dúctil implica una remoción de la sílice desde el protolito hasta las rocas de falla, fenómeno observado con la formación del cuarzo.

DISCUSIÓN

Las milonitas y ultramilonitas se desarrollaron en las denominadas unidades litoestratigráficas Granulita de Pantanillo y en la zona de Gabro (Batolito de Sabanalarga) debido a una fuerte deformación progresiva que resultó en la superposición de al menos cuatro eventos de milonitización, que provocaron una intensa reducción en el tamaño de grano y un desarrollo de una fuerte foliación milonítica. Se preservan porfiroclastos de feldespato, anfíboles y un reducido número de porfiroclastos de piroxenos.

Una gran limitante en este trabajo es no contar con dataciones para las zonas de cizalla que permitan correlacionar el desarrollo de zonas de cizalla con eventos regionales ocurridos en el occidente colombiano.

Las temperaturas de deformación estimadas para las diferentes zonas de cizalla (Tabla 1) permiten deducir que ZC1, ZC3 y ZC4 operaron en un régimen de temperatura entre 500 y 650 °C (Trouw *et al.*, 2010), lo que permite clasificarlas como milonitas de grado medio; mientras que las microestructuras desarrolladas en las zonas de cizalla ZC2 corresponden a una temperatura entre 250 y 500 °C, que dan como resultado milonitas de bajo grado (Trouw *et al.*, 2010). Esto común para las zonas de cizalla ZC1, ZC2 y ZC3.

Los indicadores cinemáticos en cada una de las zonas de cizalla se relacionan en la Tabla 1. Las zonas de cizalla ZC1 y ZC2 tienen movimientos según el rumbo y corresponden a zonas transcurrentes dextrales; las zonas de cizalla ZC3 muestran movimientos transcurrentes dextrales con un pequeño componente normal y las zonas de cizalla ZC4 corresponden a movimientos inversos con componente dextral.

La historia deformativa de estas rocas debió estar influenciada por los eventos regionales ocurridos en el margen occidental del territorio colombiano, asociados con el paso de la placa Caribe y la colisión oblicua (transpresión dextral) derivada del movimiento de dicha placa (Kennan & Pidell, 2009). Los bordes continentales transpresivos se caracterizan por deformación particionada tanto a escala mesoscópica como a escala microscópica. A escala microscópica, la abrupta transición entre milonitas y ultramilonitas indica ablandamiento de deformación durante milonitización a lo largo de bandas de grano más fino, las cuales tienden a volverse Ultramilonitas (Trouw *et al.*, 2010). Esto es común para las zonas de cizalla ZC1, ZC2 y ZC3.

Luego del emplazamiento de las rocas se desarrollarían las zonas de cizalla ZC1, como consecuencia de la partición de la deformación en un borde transpresivo dextral, en un régimen térmico necesario para generar Milonitas de grado medio (que corresponde a lo que aflora actualmente de ZC1). Posteriormente estas zonas de cizalla se debieron volver inactivas, probablemente por las rotaciones generadas en un régimen de deformación progresiva en zonas transcurrentes asociadas a transpresión; como consecuencia se formarían unas nuevas zonas de cizalla dextrales con orientaciones propicias para acomodar la deformación, en este caso ZC2. Estas se desarrollaron en un régimen térmico correspondiente a Milonitas de bajo grado. Posteriormente, por rotaciones subsecuentes las zonas de cizalla se volvieron inactivas y se desarrollaron las zonas ZC3, con cinemática dextral y con un ligero componente normal, las cuales tienen orientaciones muy parecidas a las anteriores. En campo se ve como ZC3 corta a ZC2. Las zonas de cizalla ZC3 también tuvieron un régimen térmico similar a ZC2.

Para el caso de las zonas de cizalla ZC4, las condiciones cinemáticas tienen un cambio drástico. Estas zonas presentan movimientos inversos dextrales, lo que corresponde a un cambio en el régimen de esfuerzos, el cual debió tener una componente compresiva importante. El desarrollo de ZC4 sería consecuencia de la colisión del Arco

Chocó–Panamá, cuyo inicio no está precisamente datado, pero varía del Mioceno temprano al Plioceno temprano (Suter *et al.*, 2008). Esta colisión haría que en general estas unidades se levantaran hasta niveles corticales en los que la roca respondió frágilmente ante la deformación, con desarrollo de bandas de cataclasitas y posteriormente la formación de una serie de cabalgamientos con vergencia hacia el SE.

Los análisis de roca total de las muestras no deformadas de las Granulitas de Pantanillo comparados con las muestras deformadas de las zonas de cizalla presentan ganancias significativas en SiO₂; pérdidas significativas en CaO y Na₂O y pérdidas más drásticas en K₂O, Fe₂O₃, MnO y MgO. Esta movilización del SiO₂, dentro de las zonas de cizalla, implica una remoción de la sílice desde el protolito hacia las zonas de cizalla, fenómeno observado en la formación de cuarzo. Un incremento en las pérdidas por calcinación durante la milonitización se debe, posiblemente, al incremento en la formación de minerales hidratados tales como anfíbol. Además, la movilidad de los elementos es una función de la cantidad de dichos elementos en la roca no deformada y de los minerales cristalizados y recristalizados; así que la pérdida de Mg, Mn, Fe, Na y Ca puede estar relacionada con la destrucción de piroxenos durante la milonitización.

CONCLUSIONES

Las zonas de cizalla ZC1, ZC2 y ZC3 fueron desarrolladas en la Granulita de Pantanillo y las zonas de cizalla ZC3 y ZC4 en la zona de Gabros (Batolito de Sabanalarga). Estas zonas de cizalla marcan el proceso de una fuerte deformación progresiva que da como resultado la superposición de al menos cuatro eventos de milonitización que provocaron una intensa reducción en el tamaño de grano y un desarrollo de una fuerte foliación milonítica; dicha foliación está definida por la alternancia de bandas félsicas (Ultramilonitas) y bandas oscuras (Milonitas y Protomilonitas).

La deformación desarrollada en las zonas de cizalla se caracteriza por la generación de superficies de cizalla y la reducción en el tamaño de grano de varios minerales. Los cambios más importantes que ocurren desde las rocas no deformadas a la Milonita son el decrecimiento modal de piroxeno, de plagioclasa y un incremento gradual de anfíbol y cuarzo.

La movilidad de los elementos es una función de la cantidad de dichos elementos en la roca no deformada y de

los minerales cristalizados y recristalizados; así que la pérdida de Mg, Mn, Fe, Na y Ca puede estar relacionada con la destrucción de piroxenos durante la milonitización. Un incremento en las pérdidas por calcinación ($\approx 14\%$) durante la milonitización se debe posiblemente al incremento en la formación de minerales hidratados tales como anfíbol.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas por la financiación de este estudio y por el acompañamiento a las actividades de campo de los geólogos José Ricardo Ardila y Andrés Melo.

REFERENCIAS

- Blenkinsopp, T.G. (2000). *Deformation Microstructures and Mechanisms in Mineral and Rocks*. Kluwer Academic Publishers. 150 p.
- Castro de Machuca, B., Morata, D., Pontoriero, S., & Arancibia, G. (2010). *Textural variations and chemical mobility during mylonitization: The El Tigre granitoid shear zone, Sierra de Die de Palo, western Sierras Pampeanas, San Juan*. Rev. De la Asociación Geológica Argentina. Vol.66, n.1.
- Grant, J.A. (1986). *The isocon diagram: a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration*. Economic Geology 81: 1976–1982.
- Grant, J.A. (2005). *Isocon analysis: A brief review of the method and applications*. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 30, p. 997–1004.
- Kennan, L., & Pindell, J. (2009). *Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate*. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds). The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society of London, Special Publication. P. 858.
- Kisters, A., Kolb, J., Meyer, M., & Hoernes, S. (2000). *Hydrologic segmentation of high-temperature shear zones: Structural, geochemical and isotopic evidence from auriferous mylonites of the Renco mine, Zimbabwe*. Jour. of Structural Geology, Vol. 22, p. 811–829.
- Rodríguez, G., Arango, M.I., & Bermúdez, J.G. (2012). *Batolito de Sabanalarga, plutonismo de arco en la zona de sutura entre las cortezas oceánica y continental de los Andes del Norte*. Bol. Ciencias de la Tierra. N.32, pp. 81–98. Univ. Nal. Sec. Medellín
- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., & Goring, 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, No. 1–4, p. 134–157.
- Trouw, R. A., Passchier, C. W. & Wiersma, D. J. (2010). *Atlas of Mylonites and related microstructures*. Berlin, Springer Verlag, 322 p.