

ESTUDIO DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ A PARTIR DEL ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE LA CLORITA, REGIÓN SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER

Mantilla Figueroa, L. C¹; Ríos Reyes, C. A¹; Castellanos Alarcón, O. M.¹

RESUMEN

Las cloritas en las rocas metamórficas de la Formación Silgará que afloran en la región suroccidental del Macizo de Santander (Cañón del Chicamocha) registran temperaturas de formación entre 180 y 355°C. Las máximas temperaturas de formación de esta fase mineral hidratada (hasta 355°C) corresponden a la zona de mayor grado de metamorfismo (staurolita-distena), mientras que en las zonas de la biotita y el granate (parte superior), estas temperaturas varían en promedio entre 180 y 270°C. Estos valores sugieren una rehidratación de las rocas más profundas antes que aquellas localizadas en niveles estructurales más altos de la pila metamórfica. Este proceso parece explicarse en un contexto de deformación extensiva, generador de una mayor cantidad de planos de anisotropía en profundidad, a través de los cuales circularon fluidos hidrotermales. Así mismo, la generación de estos canales debe relacionarse con el comportamiento incompetente de estas litologías en gran parte de la historia de exhumación de esta Formación.

Palabras clave: Macizo de Santander, Formación Silgará, Cloritas, Rehidratación.

ABSTRACT

Chlorites in metamorphic rocks of the Silgará Formation that crop out in the southwestern region of the Santander Massif (Chicamocha Canyon) registre formation temperatures between 180 and 355°C. The maximum temperatures of formation of this hydrated mineral phase (up to 355°C) correspond to the higher-grade metamorphic zone (staurolite-distene), while in the biotite and garnet (upper part) zones, these temperatures vary in average between 180 and 270°C. These values of temperature suggest a rehydration of the greater depth rocks rather than those from higher structural levels of the metamorphic pile. This process appears to be explained in an extensive deformation context, which has generated a major amount of anisotropy planes in depth, by which hydrothermal fluids circulated. Besides, the generation of these channels should be related to the incompetent behavior of these lithologies in a great part of the exhumation history of the this Formation.

Key words: Santander Massif, Silgará Formation, Chlorites, Rehydration.

¹Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. A.A. 678.
Correo electrónico: lcmantill@uis.edu.co

INTRODUCCION Y CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra localizada entre las localidades de Aratocha y Pescadero y forma parte de la región suroccidental del Macizo de Santander, en la cual aflora una franja de rocas metamórficas de la Formación Silgará a lo largo del Cañón del Río Chicamocha. (FIGURA 1).

Las zonas metamórficas actualmente identificadas en esta franja metamórfica (zona de la biotita, granate, estaurolita-distena), definen un descenso hacia el sur (desde Pescadero a la Mesa de San Pedro) de las condiciones máximas de Presión (P) y Temperatura (T) alcanzadas durante el pico metamórfico (Ward, *et al.*, 1973; Ríos, 1999; Castellanos, 1999; García y Ríos, 1999).

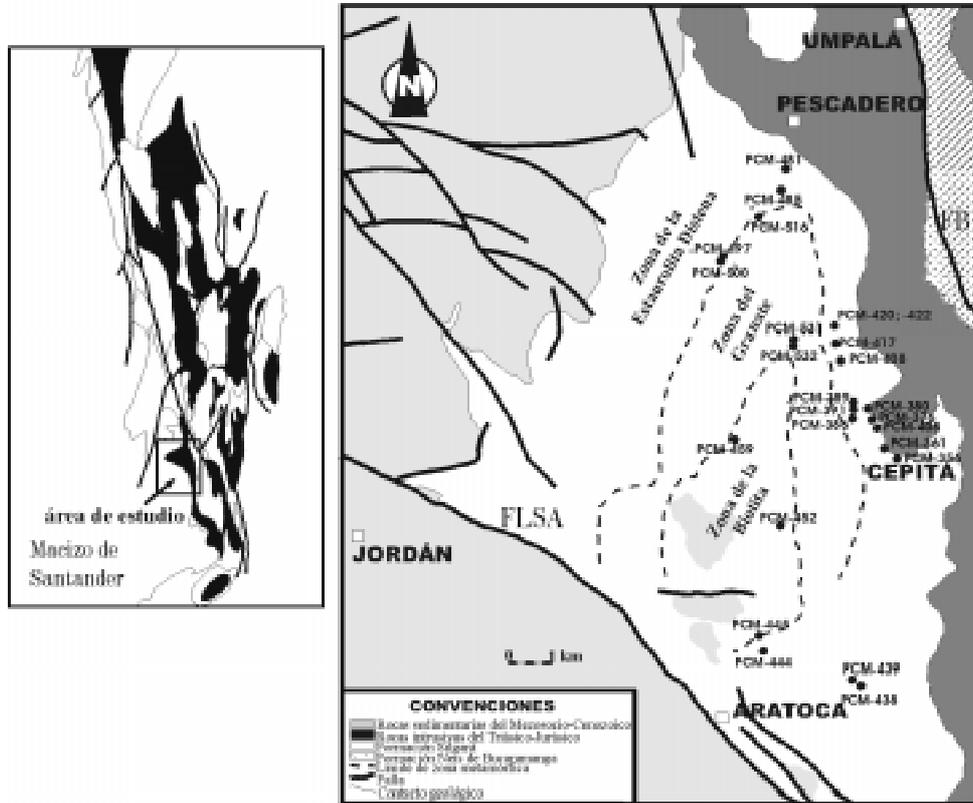


FIGURA 1. Mapa geológico generalizado del Macizo de Santander, (modificado de Goldsmith *et al.*, (1971), mostrando la distribución de las rocas metamórficas de la Formación Silgará en negro y la localización del área de estudio. Esquema geológico ampliado de la zona. Los puntos indican la ubicación de las muestras con clorita analizadas. FB, Falla de Bucaramanga; FLSA Falla Los Santos - Aratocha.

La Formación Silgará en el área de estudio ha sido interpretada como una secuencia metamórfica de grado bajo (facies de los esquistos verdes) a medio (facies de la anfibolita), con una edad que puede estar en el rango Precámbrico Superior a Ordovícico (Ward, *et al.*, 1973). Su composición litológica puede dividirse en dos unidades: (a) una unidad basal, compuesta en su mayor parte por cuarcitas con algunas intercalaciones de esquistos semipelíticos y lentes de anfibolitas y; (b) una unidad superior, constituida principalmente por esquistos, filitas y metalimolitas.

La unidad basal ocasionalmente es cortada por diques máficos (microgabros) y por diques pegmatíticos. Estos últimos, muy propagados en la zona de contacto con el granito de Pescadero.

Un estudio reciente (Mantilla *et al.*, 2001), proponen una banda de cizallamiento, con una geometría aún no muy clara, inicialmente para el límite entre las zonas del granate y estaurolita-distena. Esta banda ha sido considerada como un canal importante para el paso de fluidos hidrotermales, tal como se evidencia en campo por el gran número de venas paralelas a la

esquistosidad regional y confinadas mayoritariamente hacia el límite entre estas dos zonas metamórficas. Con relación a la trayectoria metamórfica, esta banda de cizallamiento debió desarrollarse durante la etapa de exhumación de las rocas.

Además de las estructuras de deformación asociadas con el proceso de exhumación de las rocas metamórficas del Silgará, existen otras evidencias indicadoras de este proceso, como la cloritización de biotitas, anfíboles, y granates, entre otros rasgos, los cuales se relacionan con reacciones propias de un metamorfismo retrógrado.

Considerando que la formación de cloritas requiere una presencia importante de agua en el medio y que en el caso del Silgará estas debieron formarse con posterioridad a su pico metamórfico, se formuló la tarea de establecer las condiciones de su formación para entender el proceso de rehidratación de estas rocas.

METODOLOGÍA

Para realizar este estudio se tomaron muestras de las distintas variedades litológicas en cada una de las zonas metamórficas definidas por Ríos (1999), con el propósito de analizar fundamentalmente las características químicas y texturales de las cloritas. Con este fin se realizaron análisis de microscopía de luz transmitida, usando un microscopio Labophot2-Pol, marca NIKON, y análisis de microsonda electrónica, con el fin de documentar la composición química de las cloritas. Estos últimos fueron realizados en el Research Center for Coastal Lagoon Environments de la Universidad de Shimane (Japón), usando un analizador JEOL JXA 8800M, el cual se trabajó bajo las siguientes condiciones analíticas: voltaje de aceleración de 15 kV y corriente de prueba de 2.5×10^{-8} Å. Posteriormente, estos datos químicos fueron procesados y utilizados para obtener datos fisico-químicos mediante el método de Walshe (1986). El fundamento de este método se describe en otro trabajo de Mantilla del presente boletín.

CONSIDERACIONES PREVIAS

Los innumerables estudios realizados sobre los cambios que sufren las rocas sedimentarias durante su enterramiento y su posterior transformación a rocas metamórficas, evidencian un aumento en las condiciones de P y T, el cual se traduce en la reducción de la porosidad y el volumen, así como en la deshidratación de las rocas, entre otros procesos. Contrariamente, durante la etapa de exhumación algunos de estos procesos tienden a invertirse. Entre estos resulta evidente una mayor rehidratación de las rocas a medida que aumenta la disponibilidad de agua, si tenemos en cuenta que la roca tiende a estar cada vez más cerca de la superficie y que las estructuras heredadas de deformación frágil facilitan una percolación cada vez más intensa del agua (Fyfe, 1973; Lindsey *et al.*, 1986; Robinson, 1987; Sánchez, 2001).

Las especies volátiles que participan en estos procesos de deshidratación-rehidratación son principalmente H_2O , CO_2 , S, O_2 , CH_4 , N_2 , entre otras. Con el aumento de P y T, estos volátiles tienden a escapar hacia niveles menos profundos, mientras que otra parte es retenida por la roca como fluidos ligados (o de constitución), adsorbidos y disueltos o simplemente como fluidos libres (p. ej., Inclusiones Fluidas - IF).

En este sentido, es posible estudiar las condiciones fisico-químicas del proceso de rehidratación de las rocas utilizando distintas técnicas de análisis, ya sea estudiando directamente los fluidos libres, presentes por ejemplo en las IF, o los fluidos ligados o de constitución, presentes en fases hidratadas como la clorita (ver trabajo de Mantilla Figueroa en esta edición).

MINERALOGÍA DE LA FORMACIÓN SILGARÁ

Las variedades litológicas constituyentes de la Formación Silgará en el área de estudio corresponden a rocas metapelíticas y metamáficas. Las rocas metapelíticas comprenden esquistos pelíticos de grano fino a muy fino y esquistos semipelíticos de grano medio a grueso, los cuales consisten comúnmente de cuarzo, plagioclasa, muscovita, biotita, granate y estauroлита, con subordinadas cantidades de turmalina,

apatito, circón, epidota, óxidos de Fe-Ti, y calcita. Generalmente, estas rocas contienen ilmenita y grafito. Las rocas metamáficas, contienen principalmente hornblenda, biotita, plagioclasa, cuarzo, epidota, con minerales accesorios como esfena, apatito, circón, óxidos de Fe-Ti, y calcita.

En ambas variedades la clorita aparece como mineral retrógrado, lo cual implica que los únicos minerales hidratados presentes durante el pico metamórfico fueron fundamentalmente biotita, moscovita y hornblenda. Según Fyfe *et al.* (1973), en estos minerales puede albergarse el 5 % en peso de agua que se registra comúnmente en este tipo de rocas metamórficas.

Por lo tanto, la formación de cloritas debe asociarse con la infiltración de mayor cantidad de agua,

considerando que en su composición química total se puede albergar alrededor del 12% en peso de H₂O.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS ASOCIADAS A LA PRESENCIA DE CLORITAS

Las cloritas reconocidas en el área de trabajo se presentan como: (1) diminutos cristales en las rocas de más bajo grado de metamorfismo (zona de la biotita), siguiendo las dos familias de esquistosidades (S₁ y S₂) identificadas en este sector (FIGURA 2a); (2) placas derivadas principalmente del reemplazamiento parcial o total de biotita (FIGURAS 2a, 2b, 2c) granate (FIGURA 2d), estaurilita y turmalina en rocas metapelíticas o anfíbol en rocas metamáficas, siendo en algunos casos muy común encontrar clorita como pseudomorfos de antiguas

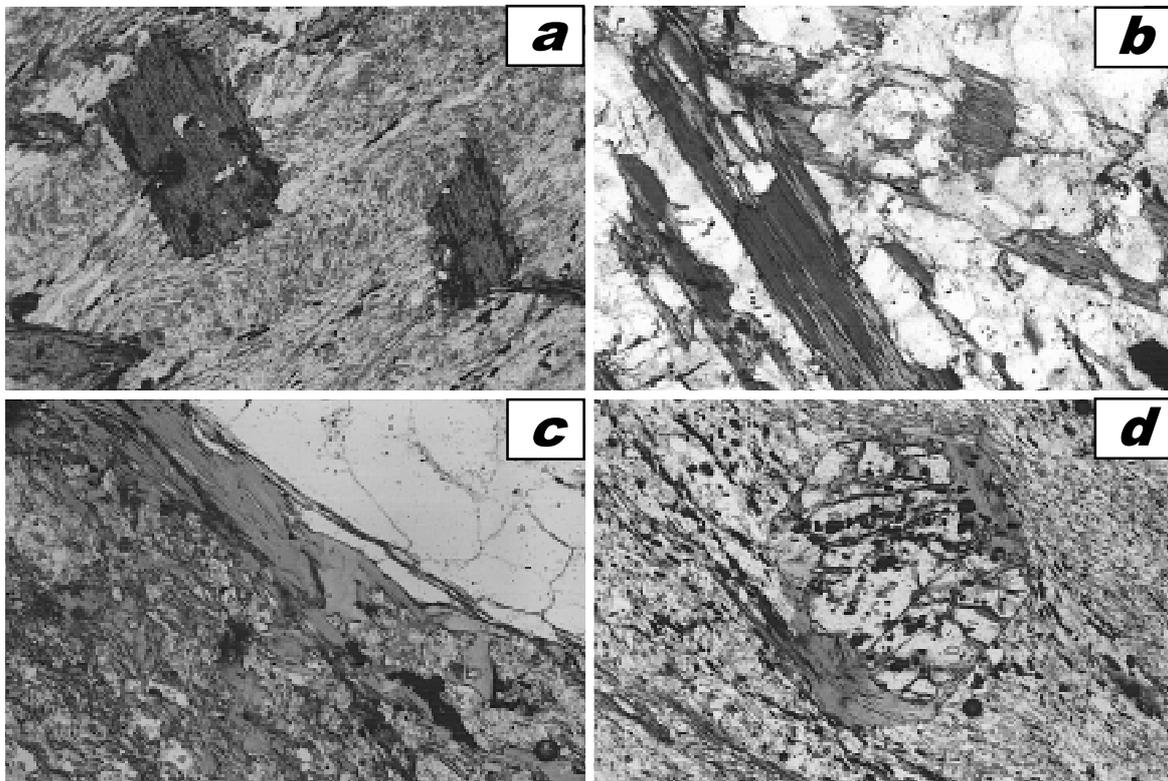


FIGURA 2. Ocurrencia de clorita en las rocas metamórficas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander. (a) Clorita después de porfidoblastos de biotita orientados al azar y de carácter post-tectónico, sobrecreciendo un clivaje de crenulación. La clorita así mismo ocurre como diminutos cristales siguiendo dos esquistosidades S₁ y S₂. Zona de la biotita (PCM-461), PPL, aumento 100x. (b) Clorita reemplazando parcialmente cristales de biotita, los cuales desarrollan dos foliaciones que se interceptan entre sí, ya sea a lo largo de su traza de exfoliación o bordes. Zona de la estaurilita-cianita (PCM-414), PPL, aumento 100x. (c) Ocurrencia de clorita como placas en la matriz de la roca. Nótese el mayor tamaño hacia el contacto con una vena de cuarzo. Zona del granate (PCM-448), PPL, aumento 100x. (d) Porfidoblasto de granate con reemplazamiento de clorita hacia en sus bordes en contacto con la matriz que lo envuelve. Zona del granate (PCM-444), PPL, aumento 100x.

biotitas, granates y anfíboles; (3) porfidoblastos comúnmente orientados al azar que cortan la foliación principal de la roca (FIGURA 2a); (4) en sombras de presión, comúnmente asociada a muscovita, desarrollándose alrededor de porfidoblastos de magnetita; (5) agregados, constituyendo parte de la matriz de la roca. Las cloritas presentes tanto en las rocas metamórficas como en las venas hidrotermales en cualquiera de los contextos petrográficos antes citados, desarrollan en algunos casos agregados variolíticos (en forma de abanico) o vermiculares (en forma de acordeón), "fish" y placas, entre otros.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CLORITAS Y SU RELACIÓN CON LA COMPOSICIÓN TOTAL DE LA ROCA

Química mineral: Una evaluación acerca de la influencia que ejerce la composición de la roca sobre la química de la clorita es de gran utilidad para entender si los efectos de la composición del sistema en el cual cristaliza la clorita son significantes o no.

Los análisis químicos representativos de la clorita en el área de estudio son dados en la TABLA 1. Las cloritas metamórficas que ocurren en el área de estudio corresponden principalmente a ripidolita, parcialmente a pycnoclorita, y en menor proporción a brunsvingita, de acuerdo con la clasificación propuesta por Hey (1954).

La relación $Mg/(Fe+Mg)$ de la clorita varía entre 0.27 y 0.75. Todas las cloritas contienen pequeñas, pero consistentes, cantidades de Mn, el cual varía entre 0.002 y 0.331 *apfu*. Las muestras representan soluciones sólidas de pycnoclorita-brunsvigita-ripidolita con 4.963-6.229 de Si y, en general, contienen cantidades aproximadamente similares de Al^{IV} y Al^{VI} (1.771-3.037 en rocas metamórficas y 2.221-3.786 en rocas metamáficas).

En la FIGURA 3 se ilustra un diagrama de clasificación, según Zane & Weiss (1998), de las cloritas analizadas, en el cual se muestra la localización de los datos analíticos de las cloritas metamórficas y cómo el campo de más alta densidad de puntos refleja el cambio de la composición de la roca. Estos puntos indican que (1) las cloritas metamórficas son de tipo I, según la nomenclatura de

Zane & Weiss (1998); (2) las cloritas en rocas metamélicas cubren un amplio rango composicional, desde cloritas ricas en Fe hasta cloritas ricas en Mg; (3) las cloritas en rocas metamáficas son principalmente ricas en Fe; (4) los contenidos de Al^{VI+} también cambian, aunque ligeramente, debido a la composición de la roca: las cloritas en rocas metamélicas muestran valores más altos de Al^{VI+} ($m = 37.03$, $s = 2.06$), con respecto a los que muestran aquellas en rocas metamáficas ($m = 34.42$, $s = 2.18$), siendo m la media y s la desviación estándar.

Las sustituciones Tschermack (TK) y "dioctaédrica" (AM): El diagrama $Al^{VI+}+2Ti+Cr$ vs Al^{IV} de la FIGURA 4 muestra las composiciones de las cloritas analizadas. En general, los datos muestran que (1) la extensión de la sustitución TK es importante tanto en rocas metamélicas como en rocas metamáficas, y es más alta que la que ocurre en los miembros extremos clinocloro-chamosita (círculo grande en la FIGURA 4), y (2) el grado de sustitución AM es también importante para un gran número de datos, con la mayor parte de estos situándose en el denominado "campo de vacancia", donde $D < 0$. Por otra parte, la FIGURA 4 muestra que la extensión de la sustitución AM no difiere significativamente entre los dos subgrupos de clorita (rocas metamélicas y rocas metamáficas), aunque es ligeramente más alta en rocas metamélicas, y que la extensión de la sustitución TK es ligeramente más alta en rocas metamélicas que en rocas metamáficas.

La sustitución $FeMg_{-1}$: La FIGURA 5 ilustra la distribución de los datos analíticos de las cloritas analizadas, mostrando que (1) la mayor parte de los datos sobre el diagrama Mg vs Fe^{2+} se sitúan en una estrecha banda; (2) las regresiones lineales son, respectivamente, $y = -0.993x + 9.0721$ (con $R^2 = 0.9152$) en rocas metamélicas, y $y = -1.153x + 9.8407$ (con $R^2 = 0.8832$) en rocas metamáficas, las cuales se desvían ligeramente de la línea 1:1 que debería reflejar únicamente una sustitución FM. Esta ligera desviación puede ser producida por la sustitución AM o por la ocurrencia de Fe^{3+} en la estructura cristalina de las cloritas metamórficas.

A partir de la sustitución FM en las cloritas metamórficas es posible deducir algunos aspectos. El amplio rango de Mg/Fe observado en la distribución de datos de las cloritas se debe principalmente a las

Estudio del proceso de rehidratación de las rocas metamórficas de la Formación Silgará a partir del análisis composicional de la Clorita, región Suroccidental del Macizo de Santander

TABLA 1. Análisis químicos representativos de la clorita en las rocas metamórficas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander.

Litología	RMP	RMP	RMP	RMP	RMP	RMP	RMP	RMM	RMM	RMM	RMM
Zona	Bt	Gr _t	Gr _t	Gr _t	St-Ky						
Muestra	PCM-459	PCM-439	PCM-444	PCM-445	PCM-386	PCM-408	PCM-485	PCM-356	PCM-481	PCM-497	PCM-380
SiO ₂	25.10	25.72	24.37	25.73	24.56	26.27	26.81	29.83	28.57	25.89	26.71
TiO ₂	0.07	0.05	0.12	0.35	0.07	0.02	0.02	0.20	4.15	0.08	0.13
Al ₂ O ₃	21.93	22.26	22.17	18.27	21.95	19.13	20.12	16.67	15.89	22.23	19.50
FeO*	27.28	19.57	25.29	31.89	25.30	24.63	21.85	18.10	15.62	15.50	24.46
MnO	0.44	0.47	0.28	0.42	0.26	1.01	1.26	0.34	0.18	0.20	0.70
MgO	11.82	18.80	14.25	9.07	15.07	15.93	17.78	20.64	17.29	22.41	15.74
CaO	0.05	0.04	0.03	0.18	0.00	0.04	0.06	0.38	4.50	0.01	0.04
Na ₂ O	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.02	0.09	0.02	0.03	0.00
K ₂ O	0.12	0.01	0.05	0.17	0.05	0.06	0.03	0.79	0.06	0.06	0.13
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.23	0.20	0.35	0.02
Total	86.81	86.92	86.61	86.08	87.30	87.12	87.96	87.27	86.48	86.76	87.43
Cationes por 28											
Si	5.406	5.307	5.215	5.758	5.212	5.585	5.553	6.101	5.900	5.244	5.634
Ti	0.011	0.008	0.019	0.059	0.011	0.003	0.003	0.031	0.645	0.012	0.021
Al	5.566	5.413	5.591	4.818	5.490	4.793	4.912	4.018	3.867	5.307	4.847
Fe ²⁺	4.913	3.376	4.525	5.967	4.489	4.379	3.785	3.096	2.697	2.625	4.314
Mn	0.080	0.082	0.051	0.080	0.046	0.182	0.221	0.059	0.031	0.034	0.125
Mg	3.795	5.783	4.546	3.026	4.767	5.049	5.491	6.294	5.323	6.767	4.950
Ca	0.012	0.009	0.007	0.043	0.001	0.009	0.013	0.083	0.996	0.002	0.009
Na	0.000	0.000	0.012	0.000	0.012	0.004	0.008	0.036	0.008	0.012	0.000
K	0.033	0.003	0.014	0.049	0.012	0.016	0.008	0.206	0.016	0.016	0.035
Cr	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.003	0.002	0.037	0.033	0.056	0.003
Total	19.816	19.980	19.982	19.799	20.043	20.024	19.995	19.961	19.517	20.076	19.938
Número de iones con base en 28											
Si	5.406	5.307	5.215	5.758	5.212	5.585	5.553	6.101	5.900	5.244	5.634
Al ^{IV}	2.594	2.693	2.785	2.242	2.788	2.415	2.447	1.899	2.100	2.756	2.366
sum T	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al ^{VI}	2.972	2.720	2.805	2.576	2.702	2.378	2.465	2.120	1.768	2.551	2.481
Cr	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.003	0.002	0.037	0.033	0.056	0.003
Ti	0.011	0.008	0.019	0.059	0.011	0.003	0.003	0.031	0.645	0.012	0.021
Fe ²⁺	4.913	3.376	4.525	5.967	4.489	4.379	3.785	3.096	2.697	2.625	4.314
Mn	0.080	0.082	0.051	0.080	0.046	0.182	0.221	0.059	0.031	0.034	0.125
Mg	3.795	5.783	4.546	3.026	4.767	5.049	5.491	6.294	5.323	6.767	4.950
sum Y	11.772	11.969	11.949	11.707	12.018	11.994	11.966	11.636	10.497	12.046	11.894
Ca	0.012	0.009	0.007	0.043	0.001	0.009	0.013	0.083	0.996	0.002	0.009
Na	0.000	0.000	0.012	0.000	0.012	0.004	0.008	0.036	0.008	0.012	0.000
K	0.033	0.003	0.014	0.049	0.012	0.016	0.008	0.206	0.016	0.016	0.035
sum X	0.045	0.011	0.033	0.092	0.026	0.030	0.029	0.325	1.019	0.029	0.044
Total	19.816	19.980	19.982	19.799	20.043	20.024	19.995	19.961	19.517	20.076	19.938

*Total Fe as FeO

RMP, roca metapelítica; RMM, roca metamáfica. Abreviaturas de minerales según Kretz (1983).

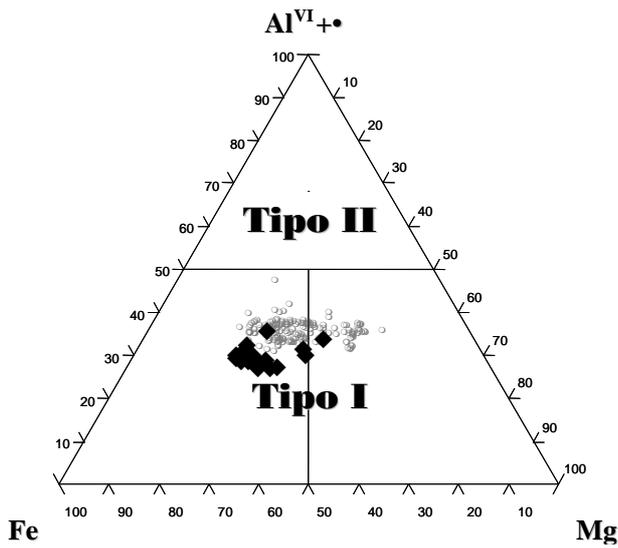


FIGURA 3. Diagrama de clasificación, según Zane & Weiss (1998), mostrando la composición química de las cloritas metamórficas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander, en función de la relación Mg/Fe y $Al^{VI}+•$. Las rocas metamáficas son indicadas con círculos grises, mientras que las rocas metamáficas son indicadas con rombos negros.

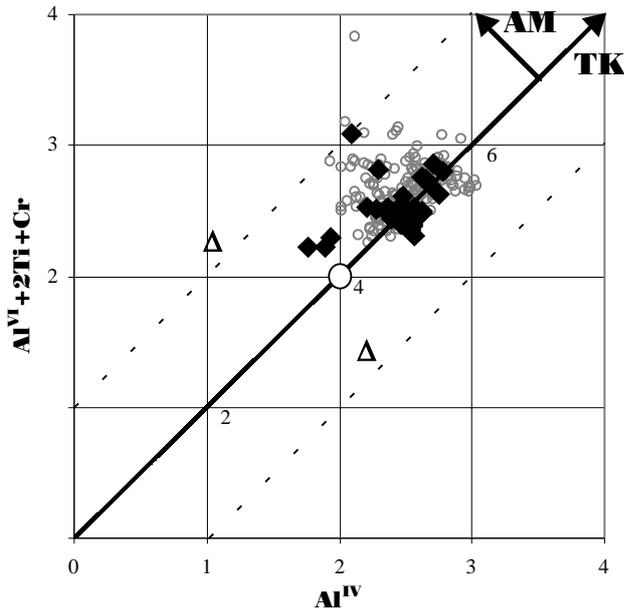


FIGURA 4. Composición química de la clorita en rocas metamórficas de la Formación Silgará expresada en el diagrama $Al^{VI}+2Ti+Cr$ vs Al^{IV} , mostrando las sustituciones Tschermack (TK) y "dioctaédrica" (AM). Las rocas metamáficas son indicadas con círculos grises, mientras que las rocas metamáficas son indicadas con rombos negros.

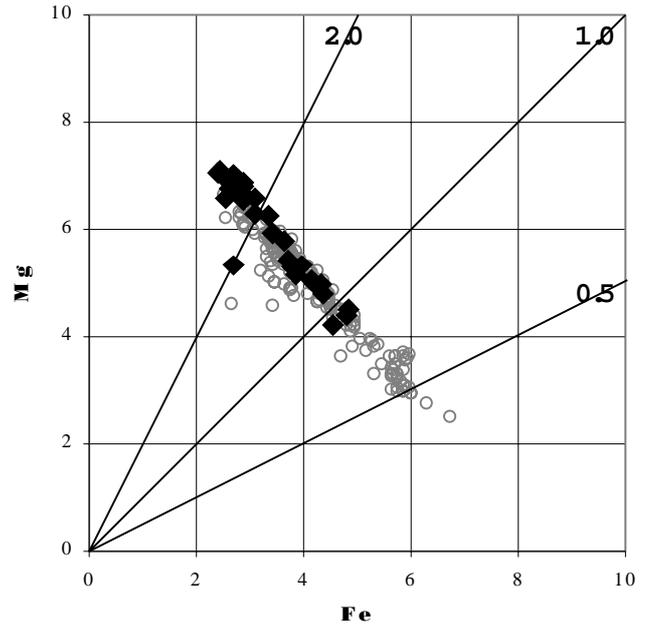


FIGURA 5. Composición química de la clorita en rocas metamórficas de la Formación Silgará expresada en el diagrama Mg vs Fe^{+2} , mostrando la sustitución FeMg-1. Las rocas metamáficas son indicadas con círculos grises, mientras que las rocas metamáficas son indicadas con rombos negros.

cloritas de rocas metamáficas; en las cuales la relación Mg/Fe varía entre 0.37 y 2.67. La relación Mg/Fe de las cloritas de rocas metamáficas varía entre 0.92 y 2.94, aunque la mayor parte de los datos es mayor que 1.0. Por otra parte, la suma Fe+Mg es ligeramente mayor en las cloritas de rocas metamáficas que en aquellas de rocas metamáficas, lo cual según Zane *et al.* (1998) refleja una sustitución más alta en las últimas.

Los datos presentados arriba muestran que la composición química de las cloritas metamórficas está fuertemente controlada por la composición de la roca.

VALORES DE T, fO_2 y fS_2 EN LAS CLORITAS

Los análisis químicos de las cloritas obtenidos mediante microsonda electrónica fueron utilizados para obtener valores de temperatura de formación de este filossilicato (TABLA 2, FIGURA 6) y calcular la fO_2 y fS_2 del medio acuoso, según el método de Walshe (1986). Estos valores, con su respectiva desviación estandar (TABLA 2), fueron obtenidos con el propósito de entender el proceso de rehidratación de la roca.

Estudio del proceso de rehidratación de las rocas metamórficas de la Formación Silgará a partir del análisis composicional de la Clorita, región Suroccidental del Macizo de Santander

TABLA 2. Valores promedios de temperatura de formación de cloritas y fO_2 y fS_2 , presentes en las zonas de biotita (Bt), granate (Grt) y estaurolita-distena (St-Ky). Abreviaturas: Alt, alteración; Prf, porfidoblastos; Spr, sombras de presión; Inc, inclusión; Mat., matriz; Psd, pseudomorfos; S₂, clivaje de crenulación; NGr, NPl, NMs, Naf, cerca a granate, plagioclasa, muscovita y anfíbol, respectivamente.

Muestra	Zona Met.	Tipo de roca	Tipo de clorita	T(°C)	σ	$\log fO_2$	σ	$\log fS_2$	σ
PCM-452	Bt	Metapel.	Alt.	235	0	-40.37	0	-14.42	0
PCM-445	Grt	Metapel.	Mat.	228	0	-37.46	0	-15.27	0
			Prf.	214	13.87	-38.92	1.46	-16.11	0.84
			NMs	180	4.24	-43.05	0.55	-18.46	0.31
PCM-532	Grt	Metapel.	Prf.	227	30.51	-37.78	3.15	-15.45	1.80
			Mat.	235	45.62	-37.10	4.80	-15.05	2.75
PCM-531	Grt	Metamáf.	Alt.	270	15	-33.55	1.32	-13.02	0.76
			S ₂	250	0	-35.27	0	-14.01	0
			Mat.	270	26.17	-33.56	2.26	-13.03	1.30
			NPl	252	0	-35.13	0	-13.93	0
			Inc.	254	0	-34.97	0	-13.84	0
PCM-438	Grt	Metapel.	Psd.	309	43.90	-30.54	3.22	-11.29	1.90
			Spr.	307	51.46	-29.78	3.44	-10.84	1.99
			Mat.	259	0	-34.48	0	-13.56	0
PCM-444	Grt	Metapel.	Alt.	286	8.99	-32.11	0.71	-12.20	0.41
			Mat.	281	0	-32.58	0	-12.46	0
PCM-439	Grt	Metapel.	Mat.	277	30.56	-33.04	2.61	-13.41	2.42
			Prf.	242	4.95	-36.16	0.47	-14.52	0.27
PCM-361	St-Ky	Metapel.	Prf.	316	76.37	-30.16	5.73	-11.06	3.32
PCM-380	St-Ky	Metapel.	Prf.	235	9.07	-36.75	0.89	-14.88	0.52
PCM-391	St-Ky	Metapel.	NGr	294	0	-31.52	0	-11.85	0
			Prf.	275	49.65	-33.41	4.08	-12.94	2.35
PCM-386	St-Ky	Metapel.	Mat.	264	19.46	-33.62	2.29	-13.3	1.01
			NGr	275	4.95	-33.02	0.46	-12.72	0.26
			Prf.	293	0.71	-31.53	0.06	-11.85	0.04
PCM-389	St-Ky	Metapel.	Prf.	250	12.38	-34.91	1.19	-14.02	0.68
			Mat.	266	13.44	-33.82	1.21	-13.18	0.70
PCM-408	St-Ky	Metapel.	Mat.	241	16.26	-36.16	1.54	-14.52	0.89
PCM-417	St-Ky	Metapel.	Mat.	285	6.81	-32.16	0.56	-12.21	0.32
			Alt.	273	1.41	-33.24	0.13	-12.84	0.08
PCM-420	St-Ky	Metapel.	Alt.	240	37.45	-36.46	3.62	-14.69	2.08
PCM-422	St-Ky	Metapel.	Mat.	271	14.42	-33.52	1.39	-12.97	0.70
PCM-485	St-Ky	Metapel.	Mat.	268	5.73	-33.71	0.49	-13.18	0.29
			Alt.	334	44.17	-28.68	3.23	-11.78	2.14
			S ₂	270	0	-33.49	0	-12.99	0
			NPl	272	0	-33.27	0	-12.86	0
PCM-500	St-Ky	Metapel.	Alt.	303	33.26	-30.84	2.48	-11.70	2.54
			NGr	272	0	-33.28	0	-12.87	0
			Mat.	304	60.62	-31.1	4.56	-13.03	0.44
			Spr.	355	0	-27.10	0	-9.29	0
			S ₂	297	61.78	-31.60	4.64	-10.48	2.57
PCM-376	St-Ky	Metapel.	Alt.	249	48.79	-35.81	4.93	-14.32	2.82
PCM-497	St-Ky	Metamáf.	Mat.	258	10.82	-34.55	0.95	-13.60	0.55
			Naf	255	0	-34.84	0	-13.76	0
PCM-516	St-Ky	Metapel.	Alt.	266	0	-33.82	0	-13.18	0
			Prf.	249	21.44	-35.92	1.78	-14.13	1.22

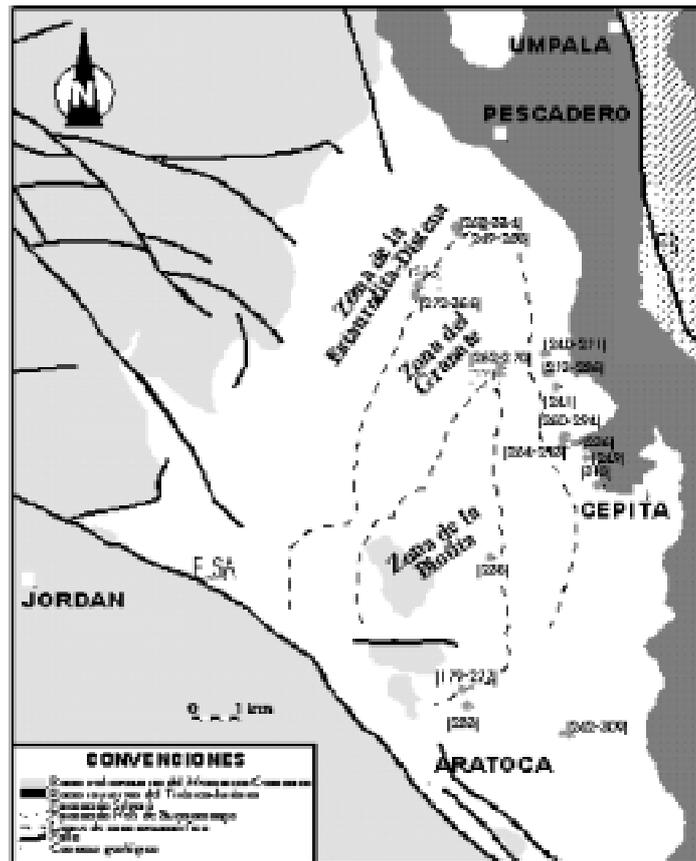


FIGURA 6. Cálculos geotermométricos usando el método propuesto por Walshe (1986) para las cloritas en rocas metamórficas de la Formación Silgará, región suroccidental del Macizo de Santander.

A partir de la TABLA 2 se comprueba que existe un rango amplio de temperaturas de formación de cloritas en las rocas del Silgará, entre 180 y 355°C.

No obstante, se observa que las muestras pertenecientes a la zona de la biotita (muestra PCM-452) y aquellas próximas a esta pero incluidas dentro de la zona del granate, presentan las más bajas temperaturas de formación, entre 180 y 270°C, contrariamente, sólo en la zona de la estaurolita-distena y una muestra (PCM-438) de la zona del granate, se alcanzan a registrar las máximas temperaturas (hasta 355°C). Así mismo, se aprecia en términos generales que en las zonas con temperaturas mayores los valores de fO_2 y fS_2 resultan ser más altos, mientras que en las zonas con menores temperaturas estos valores son significativamente más bajos (p. ej., en la muestra PCM-445 se alcanza incluso a registrar valores de $fO_2 \gg -43$ y $fS_2 \gg -18.5$).

Esto valores muestran claramente una mayor disponibilidad de oxígeno y azufre en el momento de formación de las cloritas de mayor temperatura, contrario a lo que ocurre con las cloritas de menor temperatura.

INTERPRETACIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de cloritas en las rocas metamórficas del Silgará se interpreta como el resultado de un extenso metamorfismo retrogrado, el cual se vio favorecido por la creciente disponibilidad de agua durante la historia de exhumación de la roca.

A partir del estudio químico de las cloritas se concluye que existe una pequeña variación en la relación de Fe/Mg entre las rocas metapelíticas y metamáficas, ocurriendo en las primeras una mayor sustitución. El contenido de Al, es así mismo ligeramente mayor en

las rocas metapelíticas. Con respecto a las sustituciones TK y AM, la sustitución Tschemak es muy similar en ambos tipos de rocas, mientras que la sustitución AM es mayor en el caso de las rocas metapelíticas. Por esta razón, la comparación entre los datos fisicoquímicos obtenidos a partir de la composición química de las cloritas, usando el método de Walshe (1986), tuvo presente las variaciones anteriormente mencionadas.

Por lo tanto, la exhumación de las rocas metamórficas estudiadas debe enmarcarse en una tectónica de régimen extensivo, tal como se ha propuesto en muchos terrenos metamórficos (Selverstone, 1988; Musumeci, 1992). Este aspecto con referencia a la Formación Silgará, permite considerar una exhumación gradual, preservando la estructura termal del sistema, es decir, manteniendo siempre la zona de la biotita en niveles estructurales más altos de la pila metamórfica y a una mayor profundidad la zona de la estauroлита-distena. Así mismo, en este modelo la rehidratación de las rocas debió tener lugar inicialmente en niveles más próximos a la tabla de agua (niveles estructurales más altos) y posteriormente en niveles más profundos.

Contrario al modelo anteriormente expuesto, los valores de temperatura obtenidos (FIGURA 6), apuntan a una rehidratación de los niveles estructurales más profundos antes que aquellos localizados a menor profundidad. Este hecho sugiere dos posibilidades: (1) que las rocas de la zona de la estauroлита-distena hayan estado menos enterradas que aquellas de la zona de la biotita o, (2) que las rocas hayan mantenido una posición en la vertical coherente con la estructura termal de la Formación Silgará, teniendo lugar su rehidratación temprana gracias a la percolación de fluidos hidrotermales a través de planos de discontinuidad.

Considerando el registro hidrotermal reportado por Mantilla *et al.* (2001), a partir de estudios microtermométricos de distintas familias de inclusiones fluidas en venas hidrotermales del Silgará, resulta coherente pensar en una disposición de las rocas de acuerdo a la estructura termal de esta unidad metamórfica (heredada desde el pico metamórfico), en donde la rehidratación tuvo lugar gracias a la mayor deformación que afectó las rocas, seguramente durante el desarrollo de una banda de cizallamiento,

que a la luz de los nuevos datos, parece ser de una extensión mayor que la propuesta por estos autores.

En el contexto antes mencionado parece explicable el hecho reportado por Ríos (1999), quien concluye que el comportamiento químico de las fases minerales presentes en las rocas metamórficas de la Formación Silgará no guarda relación con el grado de metamorfismo, lo cual resulta explicable, si consideramos un comportamiento incompetente de gran parte de la pila metamórfica de la Formación Silgará, especialmente con respecto a la parte inferior de la zona del granate y la zona de la estauroлита-distena.

Un aspecto adicional que corrobora el proceso de rehidratación propuesto, el cual tuvo lugar inicialmente en los niveles estructurales más profundos de la pila metamórfica, como asociado a la incompetencia de estas litologías (desarrollo de cizallamiento), tiene que ver con las características petrográficas de las cloritas. Así, por ejemplo, por lo general se observa que las cloritas de mayor temperatura de formación ocurren en sombras de presión o como porfidoblastos, los cuales texturalmente guardan una relación genética directa con microestructuras de deformación de tipo extensional. Contrariamente, las cloritas constituyentes de la matriz, relativamente con menores temperaturas de formación y de valores muy homogéneos, se interpretan como el producto de una rehidratación gradual de la roca gracias a su mayor proximidad con la tabla de agua.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos en primer lugar a la Universidad Industrial de Santander y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS, entidades que brindaron el soporte financiero para el desarrollo del trabajo de campo a través del proyecto de investigación 1102-05-083-95 "Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (COLOMBIA)", el cual permitió la recolección del material geológico objeto del presente estudio. Parte de este trabajo fue soportado también gracias a la colaboración del Research Center for Coastal Lagoon Environments

de la Universidad de Shimane (Japón), entidad con la cual Carlos A. Ríos está más que agradecido por permitirle el uso de la microsonda electrónica, durante sus estudios de Maestría.

REFERENCIAS

- Castellanos, O. (1999). Estudio Mineralógico y Petrográfico de la Formación Silgará en la Franja Pescadero-Aratoca (Santander). Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Colombia), p.136.
- Fyfe, W. (1973). Dehydration reactions. Am. Assoc. Petrol. Geol., Vol. 57, pp. 190-197.
- García, C., Ríos, C. (1999). Metamorfismo y metalogía asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (COLOMBIA). Informe final del proyecto de investigación 1102-05-083-95 Colciencias - Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, p. 191.
- Goldsmith, R., Marvin, R., Mehnert, H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D, pp. D41-D49.
- Hey, M. (1954). A new review of the chlorites. Mineralogical Magazine, Vol. 25, pp. 277-292.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist, Vol. 68, pp. 277-279.
- Lindsey, D. (1986). Heating, cooling, and uplift during Tertiary time, northern Sangre de Cristo Range, Colorado. Geol. Soc. of Am. Bull., Vol. 97, pp. 1133-1143.
- Mantilla, L., Ordóñez, J., Cepeda, S., Ríos, C. (2001). Estudio de los paleofluidos en la Formación Silgará y su relación con procesos de deformación. Sector Aaratoca-Pescadero (SW del Macizo de Santander). Boletín de Geología UIS, Vol. 23, No. 38, pp. 69-75.
- Musumeci, G. (1992). Ductile wrench tectonics and exhumation of hercynian metamorphic basement in Sardinia: Monte Grighini Complexe. Geodinamica Acta 5, pp. 119-133.
- Ríos, C. (1999). Chemical Compositions of the Constituent Minerals and P-T Conditions of the Low-grade Silgará Formation Metamorphic Rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. MSc. Thesis, Shimane University, Matsue (Japan), p. 207.
- Robinson, D. (1987). Transition from diagenesis to metamorphism in extensional and collisional settings. Geology, Vol. 15, pp. 866-869.
- Sanchez, A. (2001). La reacción de deshidratación de la muscovita en el gneiss de Torrox. Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, Vol. 24-A, pp. 141-142.
- Selverston, J. (1988). Evidence for East-West crustal extension in the eastern Alps. Implications for the unroofing history of the Tauern Window. Tectonics, Vol. 7, pp. 87-105
- Walshe, J. (1986). A Six-Component Chlorite Solid Solution Model and the Conditions of Chlorite Formation in Hydrothermal and Geothermal Systems. Economic Geology, Vol. 81, pp.681-703.
- Ward, D. et al. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, Vol. XXI, No 1-3.
- Zane, A., Weiss, Z. (1998). A procedure for classification of rock-forming chlorites based on microprobe data. Rend. Fis. Accad. Lincei 9, Vol. 9, pp. 51-56.
- Zane, A., Sassi, R., Guidotti, Ch. (1998). New data on metamorphic chlorite as petrogenetic indicator mineral, with special regard to greenschist-facies rocks. The Canadian Mineralogist, Vol. 36, pp. 713-726.

Trabajo recibido: febrero 5 de 2002

Trabajo aceptado: mayo 8 de 2002