

ESQUISTOS DE MOSCOVITA-CLORITOIDE EN LA REGIÓN DE EL RETIRO, ANTIOQUIA: GEOTERMOMETRÍA Y SIGNIFICADO TECTÓNICO

CHLORITOID-MUSCOVITE SCHISTS AT EL RETIRO REGION, ANTIOQUIA: GEOTHERMOMETRY AND TECTONIC SIGNIFICANCE

ANDRES BUSTAMANTE

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, andresbl@aim.com

LINDA VIDAL

Departamento de Geologia, Universidad Eafit, Medellín, Colombia, l_cony23@hotmail.com

JUAN PABLO FRANCO

Departamento de Geologia, Universidad Eafit, Medellín, Colombia, jfranco5@eafit.edu.co

DAVID PULIDO

Departamento de Geologia, Universidad Eafit, Medellín, Colombia, pulido_david@hotmail.com

VERÓNICA OCHOA

Departamento de Geologia, Universidad Eafit, Medellín, Colombia, verito8a141@hotmail.com

Recibido para evaluación: 10 de Septiembre de 2012 / Aceptación: 19 de Junio de 2013 / Recibida versión final: 02 de Julio de 2013

RESUMEN: Los esquistos de moscovita-cloritoide representan el metamorfismo en bajo grado, facies esquistos verde, de sedimentos pelíticos en facies anfibolita alta con relativas raras ocurrencias en la Cordillera Central de los Andes del Norte. Este litotipo se ha encontrado intercalado con metabasitas y migmatitas en facies anfibolita alta de edad Triásica expuestas en los alrededores de El Retiro, Antioquia, han sido reportadas rocas en facies granulita. En este trabajo, se hace un análisis petrográfico detallado y de química mineral de estos esquistos expuestos en la región de El Retiro, con la intención de aplicar el geotermómetro cloritoide-clorita y entender las condiciones metamórficas e implicaciones geotectónicas. Mediante la aplicación de este geotermómetro se obtuvieron temperaturas en el intervalo entre 520 y 600°C mostrando que esta asociación es estable en el bajo grado metamórfico y que puede ser transicional para la facies anfibolita, en su porción de más baja temperatura. En términos evolutivos, los datos obtenidos muestran que estas segmentos de esquistos de más bajo grado representan zonas de cizallamiento sobrepuestas al metamorfismo de alto grado expuesto en esta región. Al reconstruir la trayectoria retrograda regional de esta unidad metamórfica incluyendo resultados previamente publicados y aquellos incluidos en este trabajo, es posible sugerir que la generación de zonas de cizallamiento de más baja temperatura representan el proceso continuo de exhumación de las rocas estudiadas, pudiendo dentro del contexto regional reflejar el conjunto de rocas metamórficas de la región el segmento extensional que siguió a un orogeno colisional a ca. 230 Ma o la evolución de una zona de subducción con un importante componente extensional.

PALABRAS CLAVE: geotermómetro cloritoide-clorita, metabasitas y migmatitas, facies anfibolita alta, El Retiro, Andes del Norte.

ABSTRACT: The muscovite-chloritoid schists represent low-grade metamorphism in greenschist-facies of pelitic sediments intercalated with Triassic high grade metamorphic rocks within the Central Cordillera of the Northern Andes. In this paper, we analyzed detailed petrographic and mineral chemistry data, with the aim of applying the chloritoid-chlorite geothermometer and understand the metamorphic evolution and geotectonic implications of this rocks. Through the application of this geothermometer were obtained temperatures varying between 520 and 600 °C showing that this association is stable in low-grade metamorphic and may be transitional to the amphibolite facies in its lower temperature portion. The new field and petrologic observations suggest that these lower grade schists were placed as represent shear zones that affected the metabasites and migmatites of high amphibolite facies. When integrated with published data the results of this study confirmed the existence of a very fast exhumation trend of these Triassic belt which show affinity with conditions of extensional settings. Future research must considered this extensional pattern to evaluate the existence of collisional or subduction related orogens in the Northern Andes.

KEYWORDS: chloritoid-chlorite geothermometer, metabasites and migmatites, high amphibolite facies, El Retiro, Northern Andes.

1. INTRODUCCIÓN

Los Andes en Colombia se dividen en las Cordilleras Oriental, Central y Occidental formadas por diversos eventos de acreción cortical de terrenos oceánicos y continentales desde el Precámbrico hasta el Mesozoico (Ramos, 1999; Ramos & Aleman, 2000; Kerr et al., 2002). La Cordillera Oriental comprende una gruesa pila de sedimentos Meso-Cenozoicos que recubren discordantemente un basamento Precámbrico y Paleozoico. La Cordillera Occidental está constituida en esencia por terrenos de afinidad oceánica acrecionados a la Cordillera Central (Kerr et al., 1997). La Cordillera Central está formada por un basamento metamórfico Paleozóico a Triásico con rocas magmáticas Meso-Cenozoicas asociadas y finas capas de sedimentos de ocurrencia local (Revisión en Ordoñez-Camona et al. 2000; Vinasco et al., 2006). A pesar de la existencia de varios estudios en esta región, la mayoría de ellos han sido el resultado de campañas de cartografía geológica regional donde la sucesión de eventos metamórficos ha sido limitada a la discriminación de las principales unidades litoestratigráficas (e.g., Restrepo, 1986; González, 1999; Rodríguez et al., 2005).

Los estudios metamórficos, especialmente los que son basados en la geotermobarometría y el análisis microestructural, son esenciales para el entendimiento de los procesos que afectan la recomposición de las isothermas y la evolución de anomalías térmicas, y la correlación de estos cambios en la estructura termobárica con los procesos vinculados con la subducción, colisión y la exhumación de las rocas en cinturones orogénicos (Spear, 1993).

Aunque los estudios aquí presentados son de carácter local, se constituyen en una buena guía para investigaciones complementarias que permitan el entendimiento de la evolución en escalas mayores, incluyendo el reconocimiento de la continuidad de los procesos que permiten la construcción de orógenos de subducción o colisión.

El termómetro cloritoide-clorita es un eficiente método para calcular el grado metamórfico en rocas metasedimentarias que no presentan minerales índices diferentes (Vidal et al., 1999), sin embargo, las descripciones petrográficas de detalle y la relación

de los minerales con los dominios microestructurales continúan siendo necesarias antes de la aplicación de este termómetro o de cualquier método de termobarometría conocido.

La coexistencia de los minerales en una misma muestra continua siendo, entonces, la mejor forma de garantizar buenos resultados mediante la aplicación de esta calibración. Por esta razón, se hace necesaria la utilización de una buena cantidad de pares minerales para estimar con mayor precisión las condiciones de temperatura a las que fueron sometidos los litotipos con estas características y así evitar valores que no correspondan a lo que realmente indican, en términos de pico térmico, este tipo de asociaciones. La precisión de este método varía fuertemente con la composición de los minerales coexistentes y las incertezas analíticas y los errores son muy grandes para obtener resultados consistentes en composiciones muy ricas en Mg o Fe.

La aplicación de este termómetro en ocurrencias locales de metasedimentitas en la facies esquisto verde de la región de El Retiro, Antioquia, permite hacer inferencias en relación a las condiciones metamórficas que permitieron la aparición de estas litologías en una zona dominada por rocas metamórficas de la facies anfíbolita alta, con ocurrencias locales de rocas en la facies granulita.

2. GEOLOGÍA REGIONAL Y DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el núcleo de la Cordillera Central, departamento de Antioquia y específicamente en los municipios de El Retiro, La Ceja y alrededores de Medellín, aflora un conjunto de rocas metamórficas de alto grado que incluye anfíbolitas, migmatitas y granulitas (e.g., Botero, 1963; González, 1980; Ardila, 1986) Para Rodríguez et al., (2008) este complejo comprende las rocas metamórficas de medio a alto grado en condiciones de media a alta presión, agrupando las Anfíbolitas de Medellín, Neis de La Ceja, Neis Milonítico de Sajonia, Migmatitas de Puente Peláez y Granofels de Normandía. Las edades reportadas para este conjunto de rocas incluyen fechamientos obtenidos por el método K-Ar en roca total de 251 ± 21 Ma (Restrepo, 1986), una isócrona Sm-Nd en granate-roca total con una edad de 226 ± 10 Ma (Ordoñez, 2001) y por el método Ar-Ar en anfíbol de una anfíbolita se

obtuvo una edad de 231 ± 1 Ma (Vinasco et al., 2006), lo que indica su relación con un evento Triásico que incluye la formación de diferentes cuerpos graníticos de tipo S, y cuyo origen y extensión a lo largo de los Andes del Norte ha sido relacionado con escenarios colisionales, de subducción o de extensión (Vinasco et al., 2006; Bustamante & Juliani, 2011; Villagomez et al., 2011; Riel, et al., 2013).

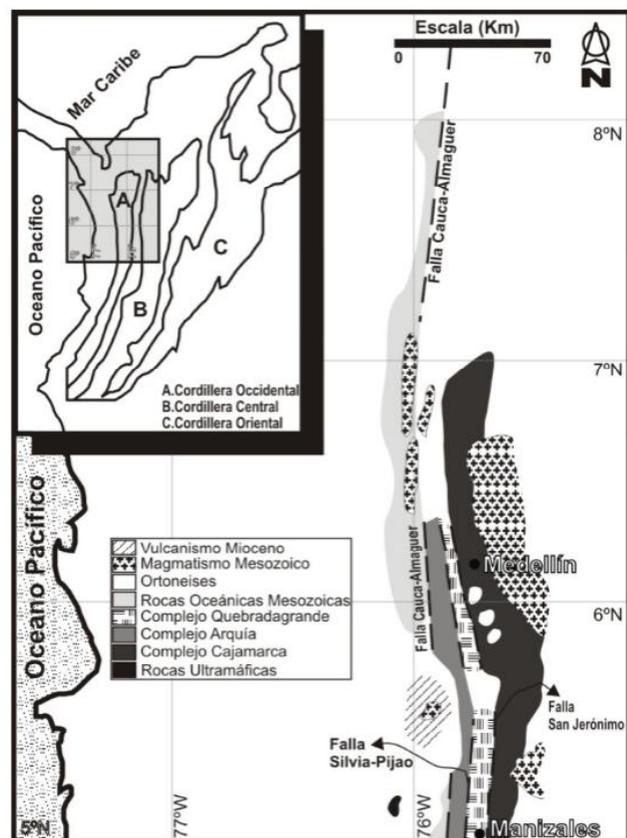


Figura 1. División de la Cordillera Central de los Andes Colombianos en unidades litodémicas. Modificado de Maya & González (1995).

3. MÉTODOS

Para los análisis de petrografía microscópica, fueron seleccionadas y preparadas las muestras en la sección de laminación del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo, Brasil. Las descripciones fueron hechas mediante el uso del microscopio petrográfico de luz transmitida Zeiss Axioplan del Laboratorio de Óptica del Departamento de Mineralogía y Geotectónica de la misma universidad.

La adquisición de las imágenes digitales fue hecha con el equipo Olympus Oly-750 y con el software ImagePro. Otro conjunto de imágenes fue obtenido en los laboratorios de geología de la Universidad Eafit, mediante la utilización del microscopio Olympus BX41 y el sistema de captura Cámara réflex Nikon D5100 y Zoom óptico 35 mm.

Para los análisis en microsonda electrónica, fueron elaboradas láminas delgadas pulidas y metalizadas con película de carbono de ~ 25 nm en evaporador Auto 206 de Edwards y los análisis fueron hechos con la microsonda electrónica JEOL, modelo JXA 8600 Superprobe en el Departamento de Mineralogía y Geotectónica del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo. Esta microsonda cuenta con cinco espectrómetros con cristales TAP/STE, TAP/PET, LIF/PET, PET/LIF, automatizada con el sistema *Voyager 3.61* de *Noran Instruments*.

Para los análisis de granate, clorita y cloritoide se utilizó un haz de electrones con diámetro de $5 \mu\text{m}$ y la corriente fue de $\sim 20,1$ nA con voltaje de 15 KV.

4. RELACIONES DE CAMPO Y PETROGRAFÍA MICROSCÓPICA

Según Maya & González (1995), la Cordillera Central es conformada por cuatro unidades litodémicas (Figura 1) separadas por fallas, cuya exposición ocurre de forma continua desde los límites con Ecuador hasta aproximadamente los 8° de latitud norte. El área de estudio hace parte del localmente llamado Complejo Cajamarca

El área de estudio se encuentra localizada en las proximidades del municipio de El Retiro, oriente de la ciudad de Medellín e incluye principalmente cuerpos de migmatitas y anfibolitas, con pequeñas intercalaciones de cuarcitas con granate y esquistos de moscovita intensamente milonitizados.

En este trabajo concentrado en la zona del Retiro se observó que los afloramientos de granulitas y neises son relativamente escasos, predominando cuerpos de rocas en la facies anfibolita, como metabasitas y migmatitas (Figura 2).

Las migmatitas son principalmente de tipo estromáticas,

con ocurrencias locales de los tipos *schlieren* y nebulítica y en algunas áreas, afloran pegmatitas y aplitas encajadas discordantemente en las rocas. Los mesosomas y melanosomas son ricos en biotita y pueden presentar agregados de fibrolita y más raramente de clorita, cloritoide y granate, con cristales de cuarzo estirado y matriz de mica blanca fina. En general los minerales que se presentan como porfiroclastos son de carácter pos-deformacional.

El leucosoma está compuesto en esencia por cuarzo y feldespato potásico, con asociaciones eventuales de pequeños cristales de micas blancas (moscovita).

Aquí fueron encontrados pequeños lentes de rocas en facies esquisto verde, constituidos por cuarcitas y esquistos moscovíticos con cloritoide, siendo que todos ellos representan zonas de milonitización.

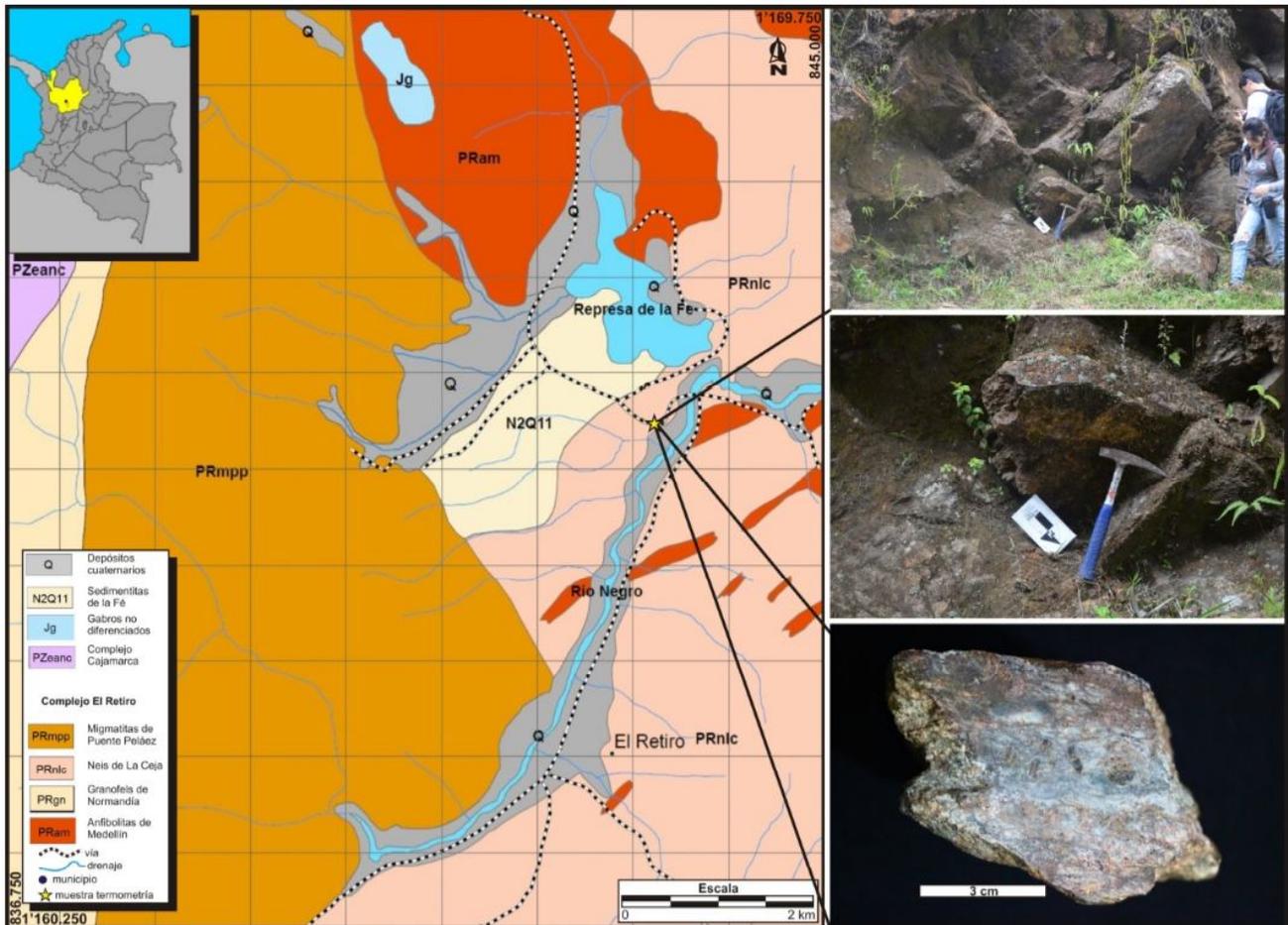


Figura 2. Mapa de localización y características de los principales litotipos descritos en este estudio según Rodríguez (2005). En la porción superior derecha se observa una vista general del afloramiento de las metasedimentitas en facies esquisto verde del área de estudio; en la parte derecha y al medio, se observa un detalle del afloramiento en el que se encuentran las metasedimentitas con cloritoide y en la parte inferior derecha un acercamiento de la muestra seleccionada para análisis de termometría.

En las proximidades de El Retiro se observa una reducida ocurrencia de migmatitas y granulitas y el predominio de anfibolitas. Estas anfibolitas se muestran poco deformadas y presentan pocas variaciones mineralógicas, siendo las más importantes pequeñas acumulaciones de biotita en algunos de

los afloramientos y silicificación en otros. Diques de composiciones que varían de basáltica a andesítica son comunes en varias partes del área.

Las anfibolitas son las rocas más comunes de la región estudiada y presentan variaciones notables en los niveles

de intemperismo. Aunque las rocas puedan exhibir foliación marcada, con pliegues isoclinales en varios afloramientos, predominan rocas macizas. Variaciones en la granulometría también son observadas, también en la escala de afloramientos, producto no solamente del metamorfismo y del tectonismo, sino también de variaciones granulométricas en el protolito.

Venas pegmatíticas cuarzo-feldespáticas con moscovita son comunes, generalmente muy intemperizadas y diques de diabasa meteorizada, de color rojizo, también son observados en algunos afloramientos.

En esta región, hay claramente la generación de foliaciones metamórficas, tanto en las migmatitas como en las metabasitas. Esta foliación metamórfica regional (S_n) desarrollada en facies anfibolita presenta otra que se le superpone, siendo una foliación milonítica (S_{n+1} o S_m) y que es la que se presenta mejor definida en rocas metasedimentarias que incluyen cuarcitas con granate y los esquistos de moscovita y cloritoide. Tanto en escala de afloramiento como en muestras macroscópicas y microscópicas puede notarse la presencia de los profiroclastos de granate de coloración rosada.

Las zonas de cizallamiento se encuentran definidas por franjas miloníticas que cortan las litologías antes mencionadas.

Afloramientos con rocas más preservadas y cuarcitas débilmente foliadas son encontradas localmente. Los afloramientos de estas litologías de más bajo grado que las metabasitas y las metasedimentarias en facies anfibolita son encontradas de manera local, siendo que los afloramientos son de tamaños métricos, alcanzando máximo 10 m de ancho (Figura 2).

Petrografía

Microscópicamente se observa que los principales minerales de las migmatitas son biotita, moscovita, cuarzo, plagioclasa cantidades variables de granate, sillimanita y a veces feldespato potásico (raramente encontrada microclina).

En algunas muestras la disposición de los granos de biotita, junto con moscovita, definen una textura lepidoblástica en la esquistosidad S_n . La biotita se

encuentra como inclusión en granate y en algunas partes define una foliación S_{n+1} .

Petrográficamente las anfibolitas, esquistos anfibólicos y anfibolitas milonitizadas poseen anfíbol (60-70%), plagioclasa (20-25%), cuarzo (5-10%) y biotita en contenido variable, siendo que en la mayoría de las muestras no hay presencia de este mineral. Como minerales subordinados (<5%) ocurren titanita, clorita, apatito, clinozoisita, circón, rutilo e ilmenita. El anfíbol se orienta según la foliación regional y/o según la foliación milonítica. En algunas de las muestras se observa zonación óptica con un núcleo más intensamente pleocroico que los bordes seguido de una porción menos pleocroica y finalizando con un borde más pleocroico, sugiriendo la existencia de un evento retrometamórfico o de re-metamorfismo en temperaturas más bajas que afectó las rocas de mayor grado, seguido por un nuevo calentamiento al final.

Finalmente, las rocas que ocurren como intercalaciones y en menor proporción son cuarcitas con granate y esquistos de moscovita y cuarzo. Este litotipo puede presentar granate y cloritoide en cantidades variables y que permiten la obtención de datos de termometría (Figura 3). Estas rocas están compuestas por cuarzo (30-50%) y moscovita fina (30-50%), además de granate, moscovita, clorita, opacos, clinozoisita-epidota, circón y cloritoide como accesorios. Las variaciones en los tenores de cuarzo y moscovita fina determinan el tipo de inclusión de los litotipos en el grupo de las cuarcitas o de los esquistos. El cuarzo es xenoblástico y muestra extinción ondulatoria intensa y en la mayoría de las muestras, los cristales están alargados formando en algunos casos ribbons. Los contactos entre los granos son suturados y muchos cristales están fracturados, aunque textura poligonal y mortero también son observadas. El cuarzo también se concentra en las sombras de presión asimétricas de los minerales opacos. La moscovita constituye cristales xenoblásticos y subidioblásticos finos (Figura 3), siempre con moscovita muy fina asociada. En general este mineral define la foliación y eventualmente puede rellenar las fracturas del granate. El granate que está presente en la mayoría de las muestras, se presenta como granos estirados y fragmentados (Figura 3), a veces reemplazado por clorita y con moscovita fina y pirofilita(?) rellenando

las fracturas. Reemplazamientos intempéricos por óxidos de hierro son comúnmente observados. La clorita en general se presenta porfiroblástica (Figura 3) y en el mismo dominio microestructural del cloritoide, aunque localmente es producto del reemplazamiento, a veces pseudomórfico, del granate. En algunos granos se pueden observar agujas de ilmenita como

inclusiones en la clorita. Clinozoisita-epidota es raro encontrarlo en las muestras, donde se presentan como cristales subidioblásticos diseminados. El cloritoide se presenta como porfiroblastos subidioblásticos de cristalización pos- S_{n+1} (Figura 3), poseen fracturas rellenas por moscovita fina y óxidos de hierro, con bordes corroídos y reemplazados por moscovita fina.

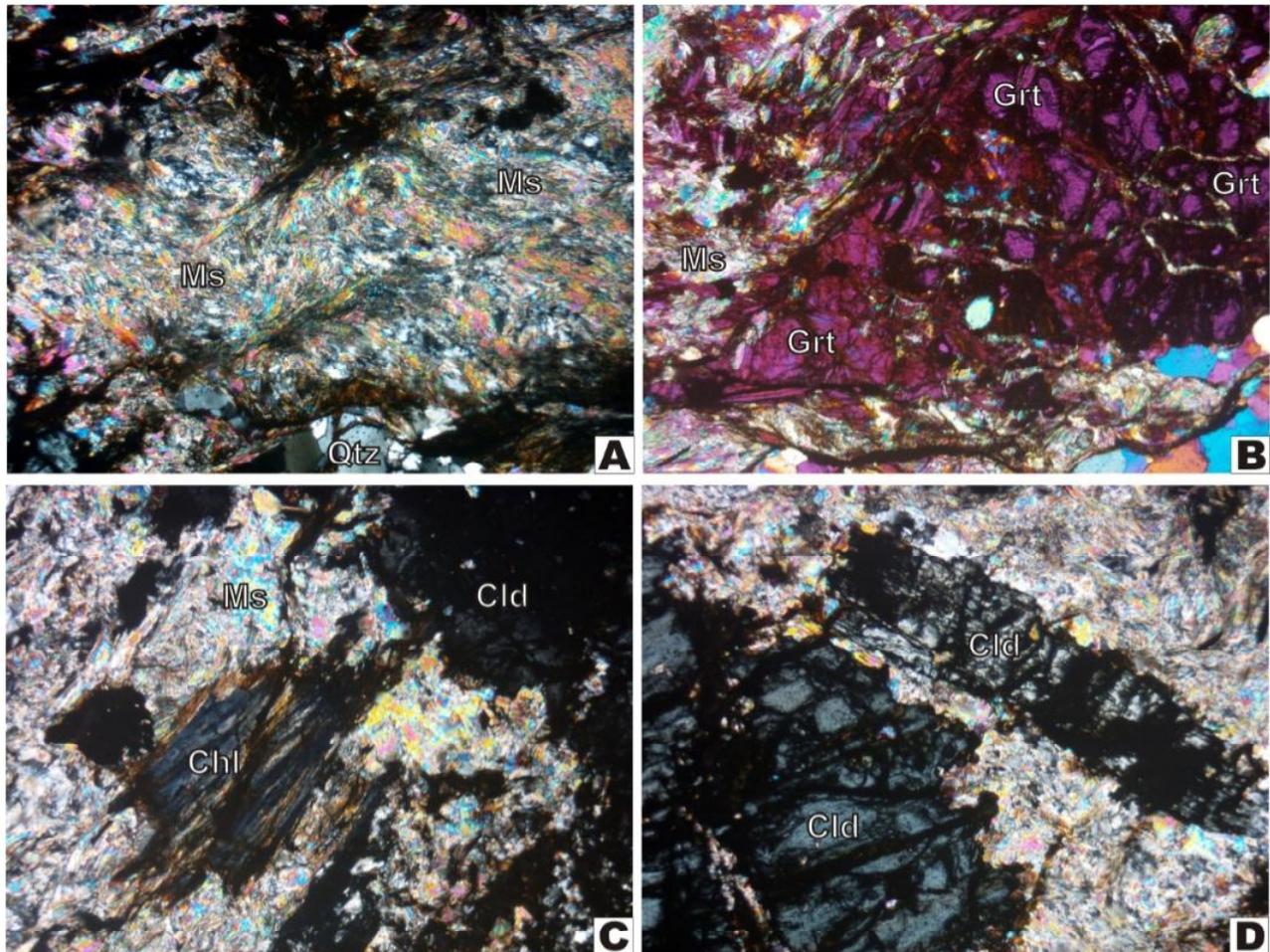


Figura 3. Características de petrografía microscópica de las rocas metapelíticas de bajo grado de la región de El Retiro, donde (A) exhibe granos de moscovita muy fina que definen una textura lepidoblástica en las muestras más micáceas; (B) granos de granate estirados y fragmentados –foto obtenida con polarizadores cruzados y retardo de λ ; (C) porfiroblasto de clorita; y (D) cloritoide cristalizado según pos- S_n .

Las relaciones de cristalización metamórfica observados para las migmatitas y metabasitas en facies anfíbolita, así como para las cuarcitas con granate y esquistos de moscovita muestran dos fases principales que relacionan las facies con las foliaciones (Figura 4).

5. ANÁLISIS MINERAL Y APLICACIÓN DEL GEOTERMÓMETRO CLORITOIDE-CLORITA

Después de los estudios petrográficos detallados fue seleccionada una muestra para cálculos de geotermometría, la cual corresponde a un esquisto de moscovita-cloritoide y que es el objeto de esta

contribución. Se resalta que solamente fue seleccionada una muestra debido a que en la mayoría de las analizadas, el nivel de intemperismo es tan intenso que impide la obtención de composiciones químicas

precisas mediante el uso de microsonda electrónica.

Los datos de análisis minerales obtenidos mediante la microsonda son presentados en la Tabla 1.

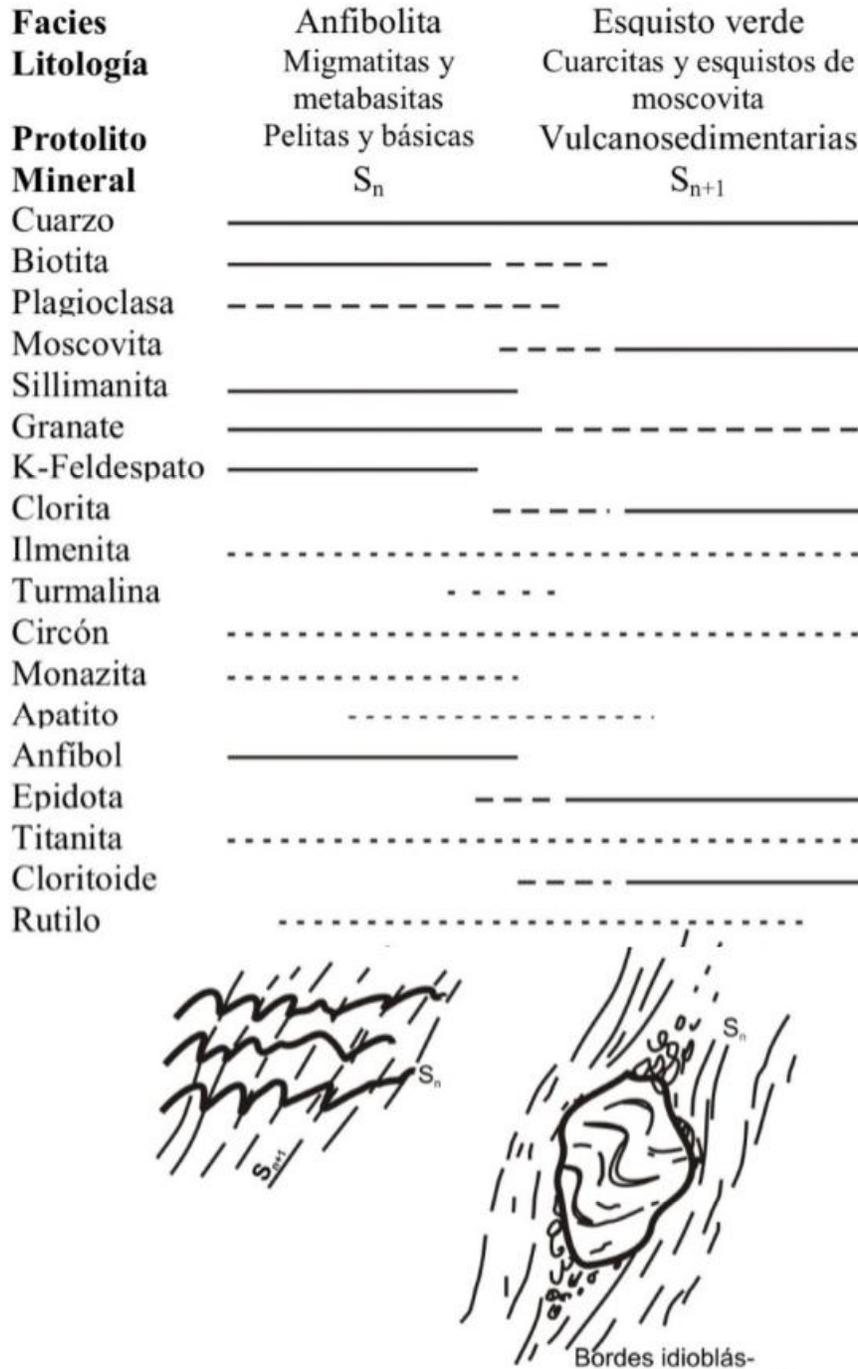


Figura 4. Relación de blastesis de las rocas de la región. En la figura se nota que hay un desarrollo de una foliación S_n y una S_{n+1} que eventualmente está relacionada con la generación de porfiroclastos pos-deformacionales como es el caso del cloritoide. En la figura, las líneas continuas representan la cristalización sin interrupción de las diferentes fases minerales, mientras que las líneas punteadas indican que la cristalización se dio posiblemente por pulsos.

Tabla 1. Análisis de cloritoide y clorita usados en los cálculos de geotermometría. Datos recalculados con 12O y 8 cationes para cloritoide y 28O y 20 cationes para clorita.

Mineral	Clid	Chl																	
Análisis	223	224	225	226	227	228	229	230	231	213	214	215	216	217	207	208	210	211	212
SiO ₂	24.68	24.73	24.77	24.73	24.73	24.47	24.51	24.52	25.01	23.65	23.66	23.64	23.48	23.52	23.86	24.48	24.49	24.32	23.94
TiO ₂	0.040	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.04	0.07	0.16	0.10
Al ₂ O ₃	40.76	40.94	40.62	40.79	40.74	40.61	40.36	40.34	40.85	23.40	23.01	23.11	23.45	23.05	23.32	23.32	22.83	23.14	23.20
FeO	23.45	22.87	23.23	23.08	23.29	23.05	23.41	23.01	23.35	26.47	25.69	26.79	26.64	26.00	24.82	24.96	25.19	24.86	24.64
MnO	0.61	0.60	0.53	0.60	0.53	0.58	0.63	0.58	0.68	0.22	0.24	0.17	0.22	0.23	0.19	0.15	0.16	0.17	0.10
MgO	2.65	2.93	3.00	2.97	2.57	2.62	2.48	2.85	2.64	12.30	13.29	12.40	12.46	12.70	13.27	13.36	13.59	13.60	13.39
CaO	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
Cl	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
F	0.00	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.08	0.00	0.03	0.00	0.00
BaO	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	92.22	92.10	92.24	92.20	91.95	91.41	91.53	91.32	92.54	86.15	86.03	86.22	86.44	85.60	85.68	86.32	86.38	86.30	85.40
O_F_Cl	0.000	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00
Si	4.75	4.75	4.76	4.75	4.77	4.74	4.76	4.76	4.79	5.11	5.11	5.12	5.07	5.11	5.15	5.23	5.24	5.20	5.17
Al ^{IV}	3.25	3.25	3.24	3.25	3.23	3.26	3.24	3.25	3.21	2.89	2.89	2.88	2.93	2.89	2.85	2.78	2.76	2.80	2.83
Al ^{VI}	5.98	6.00	5.95	5.97	6.01	6.01	5.98	5.97	5.99	3.07	2.96	3.01	3.04	3.01	3.07	3.09	2.99	3.02	3.07
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
Fe ²⁺	3.77	3.67	3.73	3.71	3.75	3.74	3.80	3.73	3.74	4.79	4.64	4.85	4.81	4.73	4.48	4.46	4.50	4.44	4.45
Mn	0.01	0.01	0.09	0.01	0.09	0.09	0.10	0.01	0.11	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
Mg	0.76	0.84	0.86	0.85	0.74	0.76	0.72	0.82	0.75	3.97	4.28	4.00	4.01	4.12	4.27	4.25	4.33	4.33	4.31
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Datos recalculados con 12O y 8 cationes para cloritoide y 28O y 20 cationes para clorita. Clid = cloritoide y Chl = clorita.

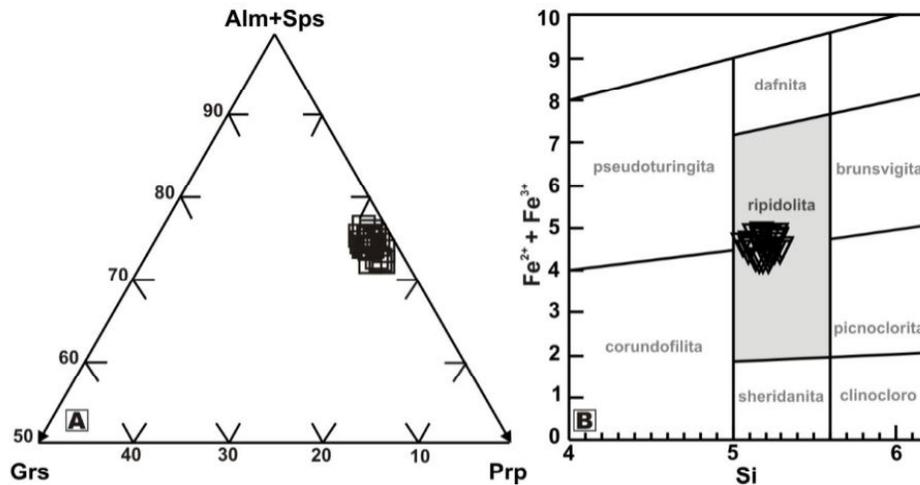


Figura 5. Composición de los granos de granate analizados en términos de sus endmembers (A) y clasificación de la clorita (B) presente en las rocas estudiadas según la propuesta de Hey (1954). En la figura Alm = almandino, Pyp = piropo, Grs = grosularia y Sps = espesartina.

El esquisto de moscovita-cloritoide seleccionado, es una roca en claro disequilibrio metamórfico con las migmatitas y las metabasitas. En términos generales,

las migmatitas y las metabasitas en facies anfibolita presentan una foliación metamórfica regional (S_n) a la que se le sobreimpone una foliación milonítica (S_{n+1} o

S_m), siendo que los minerales presentes en esta última los que fueron utilizados en los análisis de termometría.

El granate se presenta como fragmentos diseminados y exhibe una composición relativamente homogénea, rica en el componente almandínico, con contenidos importantes de piropo y cantidades menores de grosularia y esferartina. Las variaciones de los endmembers puede ser expresada de la siguiente forma: $Alm_{(70,56-71,91\%)} - Pyp_{(22,89-24,19\%)} - Grs_{(2,90-3,29\%)} - Sps_{(1,90-2,19\%)}$, donde Alm = almandino, Pyp = piropo, Grs = grosularia y Sps = esferartina (Figura 5A). La clorita, que se presenta como granos pos-deformacionales a veces plegados y muestra contenidos de FeO que varían entre 25,69 y 26,64%, Al_2O_3 entre 23,01 y 23,45% y MgO de 12,30 hasta 13,29%, presentándose como una fase relativamente homogénea. Según el esquema de clasificación de Hey (1954), la clorita de la muestra analizada corresponde a ripidolita (Figura 5B), lo que corrobora el carácter férrico y poco silíceo de este mineral.

El cloritoide constituye porfiroblastos subidioblásticos con bordes reemplazados por sericita. Químicamente presenta contenidos de Al_2O_3 entre 40,34 y 40,94%, FeO de 22,89 hasta

23,45% y MgO entre 2,48 a 3,00%.

El geotermómetro empírico cloritoide-clorita se basa en el intercambio Mg-Fe (Vidal et

al., 1999) y puede ser aplicado solamente si $XMg_{Cld} < 0,2$ y $XMg_{Cld} > 0,8$ a 700 °C, y

$XMg_{Cld} < 0,1$ e $XMg_{Cld} > 0,9$ a 300 °C. La variación presentada por el K_D con la presión es tan discreta (0,0008 kbar a 750 °K) que puede ser despreciada en el cálculo de la constante de equilibrio. La exactitud de las temperaturas obtenidas es de ± 60 °C. Las ecuaciones que definen el geotermómetro, así como el K_D son: (1) $T = 1977,7 / (\ln K_D + 0,971)$ y (2) $K_D = [(Fe/Mg)^{Cld}] / [(Fe/Mg)^{Chl}]$.

La muestra utilizada para los cálculos presenta una foliación definida por la moscovita fina, con algunos cristales de cuarzo estirado. El cloritoide constituye porfiroblastos subidioblásticos discordantes con la esquistosidad S_n evidenciando su carácter pos-deformacional. La clorita, también pos-deformacional, muestra que estos dos minerales son producto de la última etapa de crecimiento registrado en este litotipo. El geotermómetro cloritoide-clorita no es aplicable en minerales con composiciones muy ricas en Fe o Mg, siendo útil en condiciones de cloritoide como las anteriormente mencionadas.

En esta muestra los valores de XMg_{Cld} varían entre 0,159 y 0,187, y los cálculos resultan en temperaturas entre 518-603 °C, sin variaciones significativas entre el núcleo y el borde de los minerales. Apenas son observables leves insinuaciones de temperaturas más altas en los núcleos cuando son comparados con los bordes (Tabla 2).

Tabla 2. Temperaturas obtenidas mediante el uso del termómetro cloritoide-clorita en la muestra seleccionada. Las columnas en color gris se refieren a los datos de cloritoide (Cld).

par usado	Cld					Chl								
	% Fe en muestra	% Mg en muestra	Xfe	Xmg	Fe/Mg	% Fe en muestra	% Mg en muestra	Xfe	Xmg	Fe/Mg	K_D	$\ln K_D$	T°C	
223-213	3,771	0,759	0,832	0,168	4,968	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	4,116	1,415	555,8	
223-215	3,771	0,759	0,832	0,168	4,968	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	4,100	1,411	557,2	
223-217	3,771	0,759	0,832	0,168	4,968	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	4,327	1,465	538,7	
224-214*	3,674	0,839	0,814	0,186	4,379	4,639	4,278	0,520	0,480	1,084	4,038	1,396	562,4	
224-216*	3,674	0,839	0,814	0,186	4,379	4,812	4,013	0,545	0,455	1,199	3,652	1,295	599,5	
224-217*	3,674	0,839	0,814	0,186	4,379	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	3,814	1,339	583,1	
225-216*	3,732	0,859	0,813	0,187	4,345	4,812	4,013	0,545	0,455	1,199	3,623	1,287	602,6	
226-216*	3,705	0,850	0,813	0,187	4,359	4,812	4,013	0,545	0,455	1,199	3,635	1,291	601,3	
227-213	3,754	0,739	0,836	0,164	5,080	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	4,208	1,437	548,1	
227-215	3,754	0,739	0,836	0,164	5,080	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	4,192	1,433	549,5	
227-217	3,754	0,739	0,836	0,164	5,080	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	4,424	1,487	531,4	

par usado	Cld					Chl								
	% Fe en muestra	% Mg en muestra	Xfe	Xmg	Fe/Mg	% Fe en muestra	% Mg en muestra	Xfe	Xmg	Fe/Mg	K _D	lnK _D	T°C	
228-213	3,736	0,756	0,832	0,168	4,942	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	4,094	1,410	557,6	
228-215	3,736	0,756	0,832	0,168	4,942	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	4,078	1,406	559,0	
228-217	3,736	0,756	0,832	0,168	4,942	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	4,304	1,460	540,5	
229-213	3,798	0,718	0,841	0,159	5,290	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	4,382	1,478	534,5	
229-215	3,798	0,718	0,841	0,159	5,290	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	4,365	1,474	535,9	
229-217	3,798	0,718	0,841	0,159	5,290	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	4,607	1,528	518,4	
230-213	3,732	0,823	0,819	0,181	4,535	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	3,757	1,324	588,8	
230-215	3,732	0,823	0,819	0,181	4,535	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	3,742	1,320	590,3	
230-217	3,732	0,823	0,819	0,181	4,535	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	3,949	1,374	570,4	
231-213	3,737	0,753	0,832	0,168	4,963	4,786	3,965	0,547	0,453	1,207	4,111	1,414	556,1	
231-214	3,737	0,753	0,832	0,168	4,963	4,639	4,278	0,520	0,480	1,084	4,577	1,521	520,5	
231-215	3,737	0,753	0,832	0,168	4,963	4,850	4,002	0,548	0,452	1,212	4,095	1,410	557,5	
231-217	3,737	0,753	0,832	0,168	4,963	4,727	4,117	0,534	0,466	1,148	4,322	1,464	539,1	

6. DISCUSIÓN

El conjunto de rocas metamórficas que aflora en la porción noroccidental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, comprende una asociación de metabasitas y metasedimentos en facies anfibolita, migmatitas y rocas en facies granulita. La presencia de niveles cuarzosos y micáceos asociados con las anfibolitas y migmatitas en esta región sugieren que los protolitos incluyen una secuencia vulcanosedimentaria que sufrió un evento metamórfico que eventualmente proviene de la zona de la cianita (Ardila, 1986; Restrepo, 1986) y posteriormente muestra sus condiciones retrometamórficas en la zona de la sillimanita, donde experimentaron el proceso de fusión parcial. En esta zona, las migmatitas registraron condiciones de presión y temperatura del orden de 8,7 y 2,7 kbar a 740 y 633 °C respectivamente (Bustamante & Juliani, 2011) como resultado de una descompresión aproximadamente isothermal, evidenciando una fuerte descompresión con leves variaciones en la temperatura.

Estas rocas de más bajo grado exhiben una clara textura milonítica y cuando se presenta, el cloritoide muestra que es una fase pos-deformacional. El granate, común en estos litotipos, constituye granos estirados y fragmentados reemplazados por clorita y con moscovita fina rellenando las fracturas. La composición química rica en el componente almandino y con contenidos elevados de piropero, deja en evidencia que es un mineral de composición incompatible para una paragénesis con cloritoide, lo que indicaría que el granate es un relicto

de un evento metamórfico de más alto grado, pues es incompatible con la facies esquistos verde y que puede representar un reequilibrio metamórfico.

De esta forma, la composición química del granate, indica que se trata de un relicto de cristales generados en un evento metamórfico de más alto grado, como el registrado en el Triásico en la región de El Retiro, y que no se encuentra en equilibrio con los demás minerales de la facies esquistos verde.

Especialmente las migmatitas presentan una nueva fábrica milonítica en facies esquistos verde, evidenciada en las cuarcitas y esquistos micáceos con cloritoide, pero debido a este proceso retrometamórfico con intensa descompresión, las rocas con cloritoide no consiguieron el reequilibrio termodinámico.

La geotermometría basada en el par cloritoide-clorita resultó en temperaturas entre 520 y 600 °C, sin variaciones significativas entre el núcleo y el borde de los minerales. Sin embargo, se notan leves aumentos de la temperatura en dirección a los núcleos (Figura 6), lo que sugiere pequeños reequilibrios químicos del cloritoide al final del evento de cizalla. Esas temperaturas son relativamente altas para la facies esquistos verde, pero los contenidos altos de Mg del cloritoide y a clorita resultan en un K_D elevado y resulta en valores anómalos. De cualquier forma, la presencia de cloritoide en metapelitas es

una evidencia inequívoca de la facies esquistos verde para esta asociación.

Este conjunto de rocas de alto grado no fue afectado sensiblemente por eventos magmáticos y metamórficos posteriores que afectaron la Cordillera Central. No obstante, la presencia de cuarcitas y esquistos micáceos, ambos en la facies esquistos verde, intercalados en las anfibolitas y migmatitas, evidencian la generación de zonas de cizallamiento, posiblemente como resultado de la exhumación final de la roca de más alto grado.

Debido a la ausencia de datos de termobarometría, mineralógicos y texturales que confirmen la trayectoria progradada del metamorfismo, no es posible discriminar entre un evento colisional que estaría asociado a una trayectoria en sentido horario o un evento extensional que mostraría una evolución en el campo P-T en sentido antihorario. Sin embargo la aparente falta de asociaciones metamórficas afines con ambientes colisionales en el Triásico (e.g., rocas de alta o ultra alta presión) podrían sugerir que los escenarios donde prime la extensión (subducción o rifting) son probables

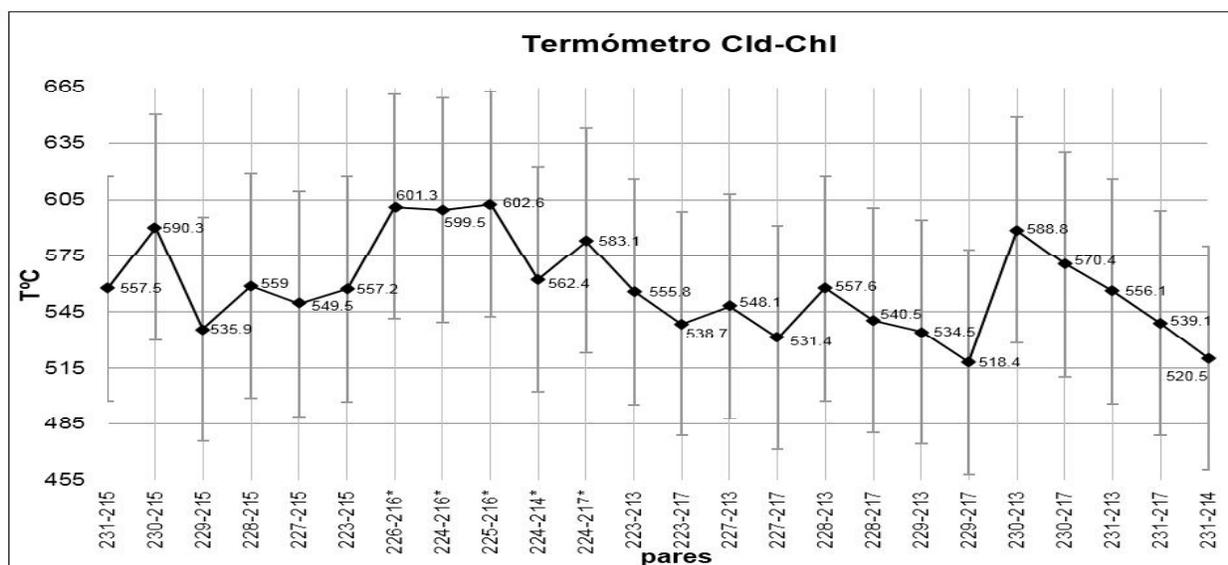


Figura 6. Temperaturas registradas por el termómetro cloritoide-clorita con su respectivo intervalo de error. *Análisis realizados con núcleos de minerales.

7. CONCLUSIONES

En el contexto evolutivo del área se presentan evidencias que las rocas en facies anfibolita alta del Triásico fueron afectadas por zonas de cizallamiento que produjeron una mineralogía retrógrada. Esta inserción se dio en condiciones compatibles con la facies esquistos verde resultando en un reequilibrio metamórfico y en la generación de esquistos de moscovita-cloritoide con relictos de granate de más alto grado. Estos esquistos de moscovita-cloritoide representan el desarrollo de una zona de cizallamiento que estaría asociado a la rápida exhumación que experimentó esta unidad durante el Triásico y que por su aparente rapidez limitó el equilibrio termodinámico. Si bien los resultados son afines con condiciones

extensionales, el escenario colisional tardío versus de extensión regional asociado a zonas de subducción o de rifteamiento (Vinasco et al., 2006; Riel, et al., 2013) queda todavía por resolver.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan su agradecimiento al Señor Harold Jiménez por su ayuda en la elaboración del mapa de localización del área de estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ardila, R. 1986. Petrografía de las rocas metamórficas de El Retiro - Antioquia. Tesis de grado. Universidad Nacional. Medellín. 178 P.

- Botero, G. 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de Minas. Universidad Nacional. Medellín*, 57: pp.1-101.
- Bustamante, A., 2003. Definição das trajetórias P-T-t em rochas metamórficas do Flanco Ocidental da Cordilheira Central da Colômbia, nas regiões de Caldas e El Retiro. *Disertación de Maestría, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP*. 107 P. Disponible en: <http://www.teses.usp.br>.
- Bustamante, A., Juliani, C., 2011. Unraveling an antique subduction process from metamorphic basement around Medellín city, Central Cordillera of Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 32: pp. 210-221.
- Dickenson, M.P., Hewitt, D.A., 1986. A garnet-chlorite geothermometer. *Geological Society of America Bulletin, Abstracts with Programs*. 586 P.
- González, H., 1999. Geología del departamento de Antioquia, Escala 1:400.000. INGEOMINAS.
- González, H., 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico INGEOMINAS*, 23(1): 174 P.
- Hey, M.H., 1954. A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine* 30: pp. 277-292.
- Kerr, A.C., Aspden, J.A., Tarney, J., Pilatasig, L.F., 2002. The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador; geochemical and tectonic constraints. *Journal of Geological Society of London* 159: pp. 577-594.
- Kerr, A.C., Marriner, G.F., Tarney J., Nivia, A., Saunders, A.D., Thirlwall, M.F., Sinton, C.W., 1997. Cretaceous basaltic terranes in western Colombia: elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology* 38: pp. 677-702.
- Maya M., González, H., 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS* 35: pp. 43-57.
- Ordóñez, O., 2001. Caracterização isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magmáticos nos Andes colombianos. Tesis de doctorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF., 197 P.
- Ordóñez, O., Pimentel, M.M., Correa, A.M., Martens, U., Restrepo, J.J. 2000. Edad Sm/Nd del metamorfismo de alto grado de El Retiro (Antioquia). *Resúmenes Coloquio sobre el Precámbrico. INGEOMINAS. Bogotá*.
- Ramos, V., 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes* 22: pp. 183-190.
- Ramos, V., Aleman, A., 2000. Tectonic evolution of the Andes. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Filho, A.T., Campos, D.A. (eds) *Tectonic evolution of South America*. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 635-685.
- Restrepo, J.J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Trabajo promoción a profesor titular. Universidad Nacional, Medellín, 276 P.
- Riel, N., Guillot, S., Jaillard, E., Martelat, J.E., Paquette, J.L., Schwartz, S., Gonçalves, P., Duclaux, G., Thebaud, N., Lanari, P., Janots, E., Yuquilema, J., 2013. Metamorphic and geochronological study of the Triassic El Oro metamorphic complex, Ecuador: Implications for high-temperature metamorphism in a forearc zone. *Lithos* 156-159: pp. 41-68.
- Rodríguez, G., González, H., Zapata, G., 2005. Geología de la plancha 147 Medellín Oriental, Ingeominas, Bogotá. 320 P.
- Rodríguez, G., González, H., Zapata, G., 2008. Complejo El Retiro, Cordillera Central, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 22: pp. 101-121.
- Spear, F.S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineralogical Society of America*, 799 P.
- Vidal, O., Goffé, B., Bousquet, R., Parra, T., 1999. Calibration and testing of an empirical chloritoid-chlorite Mg-Fe exchange thermometer and thermodynamic data for daphnite. *Journal of Metamorphic Geology* 17: pp. 25-39.
- Vinasco, C. J., Cordani, U.G., Weber, M., Peláez, C., 2006. Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses. *Journal of South American Earth Sciences* 21: pp. 355-371.