

GRANULITAS DE LOS MANGOS, UN FRAGMENTO GRENVILLIANO EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

por

Oswaldo Ordóñez Carmona¹, Márcio M. Pimentel², Renato de Moraes³

Resumen

Ordóñez Carmona, O., M. M. Pimentel & R. de Moraes: Granulitas de los mangos, un fragmento grenvilliano en la parte oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **26**(99): 169-179. ISSN 0370-3908.

Las Granulitas de Los Mangos conforman el basamento metamórfico de la Sierra Nevada de Santa Marta. Es una secuencia bandeada de metamorfitas con predominio de gneises, granulitas y anfibolitas. Algunas de las asociaciones mineralógicas son típicas de la facies granulita, destacándose las de ortopiroxeno-granate-mesopertita, ortoclasa-granate-biotita y clinopiroxeno-cuarzo.

Con el par granate-roca total se obtuvo una edad isocrónica Sm-Nd de 971 ± 8 Ma, interpretada como la edad del metamorfismo de alto grado asociado al evento orogénico Grenville.

Las edades modelo T_{DM} entre 1.47 y 1.92 Ga y los valores $\epsilon_{Nd}(T=971 \text{ Ma})$, entre +0.37 y -5.02, sugieren, para los protolitos de las Granulitas de Los Mangos, la presencia de materiales corticales tan antiguos como ~1.9 Ga.

Palabras clave: Facies granulita, Los Mangos, orogenia Grenville, Precámbrico, Sierra Nevada de Santa Marta.

Abstract

The Los Mangos Granulites is the metamorphic basement of the Sierra Nevada de Santa Marta massif. Gneisses, granulites, and amphibolites are the predominant rocks. The orthopyroxene-garnet-mesopertite, orthoclase-garnet-biotite, and clinopyroxene-quartz are the mineral associations of the granulite facies present in this sequence.

¹ Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. AA 1027 Medellín-Colombia. e-mail: oordonez@unalmed.edu.co

² Instituto de Geociencias-Universidad de Brasilia-Brasil. CEP 70910-900.

³ Laboratory for Crustal Petrology, Department of Geology, University of Maryland, College Park, MD, USA. 20742.

Sm-Nd isotopic study yield a garnet-whole rock age of 971 ± 8 Ma, interpreted as the high-grade metamorphic age, and associated with the orogenic Grenville event.

The T_{DM} model ages between 1.47 and 1.92 Ga, and $e_{Nd}(T=971 \text{ Ma})$, values between +0.37 to -5.02, suggest the presence of crustal material, and ca. 1.9 Ga age for the protoliths of the Los Mangos Granulites.

Key words: Granulite facies, Los Mangos, Grenville orogeny, Precambrian, Sierra Nevada de Santa Marta.

Introducción

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), localizada en la parte norte de Colombia, es una de las regiones geológicamente más interesantes y complejas de la parte septentrional de Suramérica. Aparece como un sistema montañoso independiente de los Andes, sin embargo, en él se encuentra buena parte de las principales unidades, eventos y estructuras que ocurren a lo largo de toda la región andina colombiana, éste es: existe un basamento precámbrico, rocas metamórficas y sedimentarias paleozoicas, plutonismo y vulcanismo mesozoico, magmatismo y sedimentación del Cretáceo y Cenozoico. En otras palabras, la historia geológica de esta región registra eventos geológicos cronológicamente sucesivos, siendo él más antiguo de aproximadamente 1400 Ma, representado por parte del basamento metamórfico.

En este trabajo, se presentan los resultados petrográficos, isotópicos y geocronológicos de las denominadas Granulitas de Los Mangos, las que pueden ser consideradas como parte del basamento del sector oriental de la SNSM.

Contexto regional

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), es una región montañosa de aproximadamente 13.700 km² con alturas que van desde el nivel del mar hasta casi los 5.800 m. Esta entidad estructural está limitada por sistemas de fallas y cuencas rellenas con sedimentos de edad Terciaria-Cuaternaria. El Mar Caribe y la falla de Oca limitan el macizo en su parte norte, la falla de Bucaramanga forma el límite suroccidental y el lineamiento del Cesar junto a los Valles de los ríos Cesar y Ranchería constituyen el límite suroriental (Fig. 1).

Según **González et al.** (1988), la SNSM y las regiones adyacentes son un complejo mosaico estructural, resultado de procesos de subducción a lo largo del lineamiento arqueado de Sevilla y de un fallamiento transcurrente asociado al sistema este-oeste de Oca y al sistema de rumbo

N15°W, de la falla de Bucaramanga, en los bordes norte y oeste del macizo.

Los estudios geológicos realizados en esta región y que involucran trabajo de campo, petrografía y geocronología, se limitan a los efectuados por **MacDonald & Hurley** (1969), **Tschanz et al.** (1969, 1974) y **Restrepo et al.** (1997), trabajos que serán las referencias base para este artículo.

Geotectónicamente, la SNSM se divide, de oriente a occidente, en tres provincias (**Tschanz et al.** 1969, 1974):

- Sierra Nevada
- Sevilla
- Santa Marta

Estas tres provincias tienen un basamento metamórfico el cual fue intruido por plutonitas Meso y Cenozoicas, rocas que en su conjunto constituyen más del 90% del macizo.

La provincia de la Sierra Nevada, localizada en la región suroriental, es la mayor y tiene como característica la presencia de un basamento granulítico, de edad Precámbrica, intruido por inmensos cuerpos de granitoides durante el Mesozoico. Está limitada al sureste por los valles de los ríos Cesar y Ranchería y por el lineamiento del Cesar, que separa a la provincia de la Serranía de Perijá; su límite noroeste está representado por la falla o lineamiento de Sevilla, el cual la separa de la provincia de Sevilla, al norte la falla de Oca la separa de las zonas planas de la Península de la Guajira y al suroeste la falla de Bucaramanga la separa de las zonas planas del valle del Magdalena.

La provincia de Sevilla, localizada al oeste de la falla del mismo nombre, se caracteriza por presentar un cinturón polimetamórfico de gneises máficos de posible edad Paleozoica Inferior, esquistos del Jurásico y pequeños bloques alóctonos de granulitas precámbricas (**Tschanz et al.** 1974). Esta provincia está intruida por cuerpos dioríticos del Pérmico y granitoides Meso y Cenozoicos.

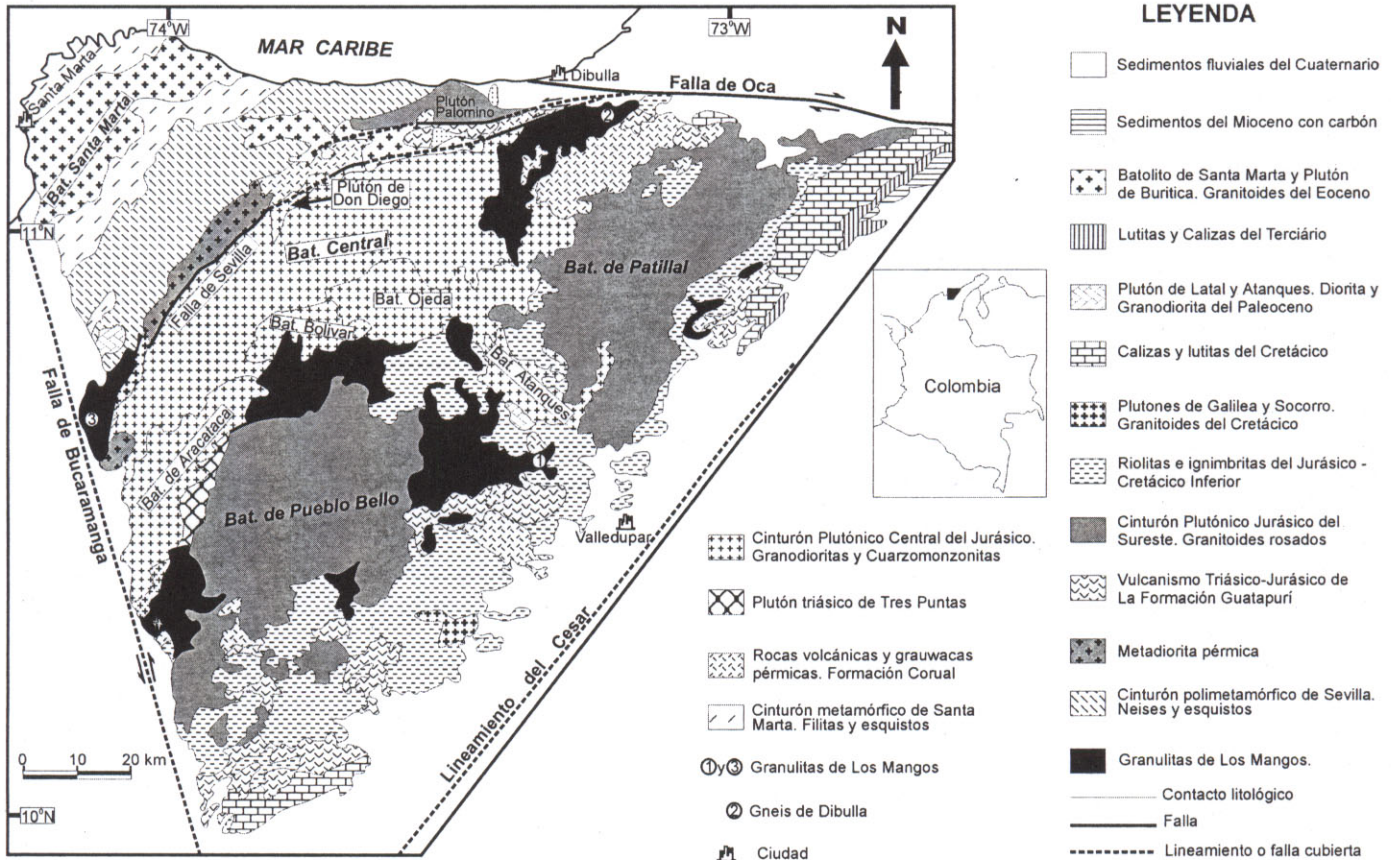


Figura 1. Mapa geológico simplificado de La Sierra Nevada de Santa Marta (modificado de Tschanz et al., 1969, 1974)

La provincia de Santa Marta, localizada en la parte noroeste del macizo, limita al sureste con el cinturón metamórfico de Sevilla, al norte y occidente con el Mar Caribe y al suroeste con la falla de Bucaramanga. Está conformada por el batolito del mismo nombre, de edad Terciaria y orientado en dirección noreste, y por dos franjas paralelas predominantemente constituidas por esquistos.

Rocas de alto grado metamórfico, que en principio son correlacionables con las que hacen parte del basamento precámbrico de la SNSM, se localizan en otras regiones de los Andes colombianos y aparecen a manera de bloques aislados y separados unos de otros. Al sur de la Cordillera Oriental aparece el macizo de Garzón, el cual está constituido por rocas de alto grado metamórfico y granitoides precámbricos y jurásicos (Kroonenberg, 1982, 1982a). En la parte norte de la Cordillera Oriental, en el macizo de Santander, aflora un conjunto de rocas metamórficas de facies anfibolita alta, las cuales fueron agrupadas en el llamado Gneis de Bucaramanga (Ward et al. 1973). Sobre el flanco este de la Cordillera Central se localizan

algunos afloramientos de rocas metamórficas de medio a alto grado metamórfico entre las que se destacan las Anfibolitas de Tierradentro (Vesga & Barrero, 1978) y las Milonitas de El Vapor (Ordóñez et al. 1999).

En algunas de estas áreas se han realizado estudios geocronológicos, entre estos se destacan los siguientes: en la Sierra Nevada de Santa Marta (MacDonald & Hurley, 1969; Tschanz et al., 1974; Restrepo et al., 1997), macizo de Santander (Ward et al., 1973; Restrepo et al., 1997), macizo de Garzón (Álvarez, 1981; Álvarez & Linares 1984; Priem et al., 1989; Restrepo et al., 1997), flanco oriental de la Cordillera Central (Vesga & Barrero, 1978; Restrepo et al., 1997; Ordóñez et al., 1999). En general, los estudios indican que existen fragmentos corticales precámbricos, los cuales constituyen el basamento de la parte Oriental de los Andes Colombianos y que se generaron o fueron afectados significativamente por un evento crono-correlacionable con la orogenia Grenville (1160-900 Ma), similar al registrado en la parte oriental de Norte América.

Geología local

La cartografía de la SNSM está presentada en un mapa a escala 1:200.000, realizado por **Tschanz et al.** (1969), pero el informe con las descripciones detalladas de las unidades no ha sido publicado. Las rocas de interés para este estudio se localizan en la parte central y sureste de la SNSM y hacen parte de un conjunto de rocas de alto grado metamórfico (facies anfibolita alta hasta facies granulita), el cual aflora principalmente al sureste del lineamiento o falla de Sevilla y constituye el basamento de la provincia Sierra Nevada.

Las metamorfitas precámbricas afloran en intercalaciones centimétricas a métricas de rocas félsicas y máficas, muchas de las cuales presentan las asociaciones minerales de la facies granulita. Los gneises se presentan bandeados, con las bandas claras de gneises cuarzo feldespáticos y los gneises con hornblenda-clinopiroxeno en las bandas melanocráticas. Granulitas cuarzo-pertíticas y las típicas con granate y piroxeno, junto a las anfibolitas constituyen las otras rocas de esta unidad. **Gansser** (1955) indicó la presencia, local e intercalada con las rocas más comunes, de metamorfitas calcáreas con olivino y wollastonita. Adicionalmente, **Tschanz et al.** (1969) reportan, en la parte occidental, bandas y lentes de anortositas.

El bandeamiento y la presencia composicional tan variada permite en principio asociar el protolito de las metamorfitas a una secuencia volcano-sedimentaria, la cual fue afectada por un evento a condiciones de presión-temperatura (P-T) de la facies granulita. La ocurrencia localizada de anortositas puede estar asociada a la intrusión de silos, sin embargo, la edad y génesis de este evento son aún incógnitas.

La secuencia de metamorfitas de alto grado, se ha agrupado en las denominadas Granulitas de Los Mangos (**Tschanz et al.**, 1969, 1974) y algunos de los mejores afloramientos se localizan sobre el cauce de los ríos Guatapurí y Mangos a unos 15 km al noroeste de la ciudad de Valledupar (punto 1, Fig.1). **Tschanz et al.** (1974) obtuvieron una edad K-Ar en hornblenda de 940 ± 30 Ma, para un gneis con hornblenda, piroxeno, granate y plagioclasa (punto 3, Fig. 1).

En la parte norte de la SNSM, y en la misma provincia de Sierra Nevada, aflora un conjunto de gneises bandeados, en donde predomina un gneis con hornblenda y plagioclasa. Esta unidad no presenta rocas con una mineralogía típica de la facies granulita, como es el caso de las anteriormente descritas y fue agrupada por **MacDonald & Hurley** (1969) en el llamado Gneis de Dibulla.

Los afloramientos característicos de estos gneises se localizan a unos 12 km al sureste de la población de Dibulla, en especial en el cauce y riberas del río Jerez o Dibulla. Para el Gneis de Dibulla **MacDonald & Hurley** (1969), obtuvieron una edad isocrónica Rb/Sr de 1400 Ma y una relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial de 0.703.

Recientemente, **Restrepo et al.** (1997), realizaron trabajos de datación en circones de muestras de estas unidades. En circones, de carácter detrítico, de una muestra del Gneis de Dibulla, fueron obtenidas edades U/Pb entre 1.0 y 1.3 Ga. Igualmente, para una muestra de las Granulitas de Los Mangos, se obtuvo por U/Pb una edad de 1513 ± 35 Ma (intercepto superior), interpretada como asociada a la edad de cristalización de parte del protolito y una edad de 456 ± 60 Ma (intercepto inferior) e interpretada como asociada al metamorfismo regional de la orogenia Caparonensis.

Finalmente, la edad isocrónica Rb/Sr de 1400 Ma, obtenida por MacDonald y Hurley (1969), junto a las edades U/Pb entre 1.0 y 1.3 Ga obtenidas por Restrepo *et al.* (1997) para el Gneis de Dibulla no permiten establecer una correlación entre esta unidad y las Granulitas de Los Mangos y los estudios posteriores se encargarán de dar respuesta a este asunto.

Petrografía

Para los estudios petrográficos e isotópicos se dispuso de 10 muestras, las cuales fueron colectadas en afloramientos de roca fresca que abundan en las riberas de los ríos Guatapurí y Mangos en la sección tipo a partir de la cual se derivó el nombre de Granulitas de Los Mangos (punto 1, Fig. 1).

La secuencia metamórfica de alto grado que aflora en la confluencia de los ríos Guatapurí y Mangos, presenta en afloramiento un bandeamiento composicional. Tal bandeamiento corresponde a una estructura heredada del protolito, posiblemente vulcano-sedimentario. A partir del estudio de las muestras de mano se destaca la presencia de anfibolitas, gneises y granulitas, rocas en general de grano medio. Considerando la variedad y la falta de descripciones detalladas de las rocas que componen esta secuencia, se realizaron estudios petrográficos a partir del estudio de secciones delgadas, los cuales se realizaron en los laboratorios de petrografía de la Universidad de Brasilia. Los resultados y una descripción de las principales unidades que afloran en este sector son presentados a continuación:

Anfibolitas (GRM-1)

Compuesta principalmente por plagioclasa y hornblenda, en menor cantidad se tiene biotita, cuarzo y

opacos, como accesorio se destaca el apatito. La textura es granoblástica orientada, con la foliación definida por los prismas alargados de anfíbol y algunos granos alargados de plagioclasa. Paralelos a la foliación se presentan agregados de granos de cuarzo y finas hojas de biotita.

En algunos granos, la hornblenda presenta extinción ondulatoria discreta con fracturas como las microestructuras más comunes. Son frecuentes las inclusiones de cuarzo, plagioclasa y minerales opacos. Es común la presencia de bordes alterados a un material microcristalino, en algunos casos es posible identificarlo como un Intercrecimiento de actinolita, clorita, mica blanca, minerales opacos y biotita.

La plagioclasa tiene como microestructuras más comunes una extinción ondulatoria y subgranos y granos con bordes recrystalizados. La extinción ondulatoria es concéntrica indicando que algunos granos tienen zonación química. La presencia de más de un sistema de maclas indica un origen por deformación. Algunos granos están deformados de modo que las maclas se presentan levemente curvas. La saururización ocurre preferentemente a lo largo de las fracturas con la transformación de plagioclasa a mica blanca. La diferencia de relieve entre plagioclasa y cuarzo indica que la composición de la primera debe ser entre andesina y labradorita.

La biotita presenta pleocroísmo de rojo a marrón oscuro.

Gneises bandeados (GRM-2 y 3)

La roca presenta bandeamiento composicional centimétrico, con una de las bandas compuesta básicamente por cuarzo y feldespatos (banda 1), y la otra compuesta por cuarzo, plagioclasa y hornblenda (banda 2). El contacto entre estas es transicional y ocurre en una capa de 5 mm, en donde se observa un aumento en la proporción de hornblenda y la disminución en la cantidad de ortoclasa, partiendo de la banda rica en este último. El bandeamiento es paralelo a la foliación, la cual está definida por granos alargados de cuarzo, feldespatos y por agregados alargados de granos más finos de estos minerales y por hornblenda y biotita cuando están presentes.

Banda 1. compuesta de cuarzo, plagioclasa, ortoclasa pertítica, biotita, hornblenda, circón y opacos. El cuarzo forma granos xenoblásticos alargados paralelamente a la foliación. El alargamiento de los granos forma una cinta de cuarzo que puede prolongarse por más de 2 cm; al interior de estas cintas es común la presencia de subgranos y bandas de deformación; ya en los bordes aparecen granos menores sin texturas deformacionales, los cuales también se presentan en la matriz.

La plagioclasa forma granos alargados finamente maclados con exsoluciones en forma rectangular o de gotas. Es común la presencia de subgranos o granos recrystalizados. Buena parte de los granos presenta una alteración de color castaño. Algunos granos saururizados están sustituidos por mica blanca y carbonato. La relación de relieve con el cuarzo indica una composición de andesina.

La ortoclasa está subordinada a la plagioclasa, comúnmente pertítica con exsoluciones de albita en forma de gotas o agujas. Cuando está en contacto con plagioclasa es común la formación de mirmequitas, que sustituyen la plagioclasa por un intercrecimiento de albita + cuarzo.

Banda 2. Cuarzo, plagioclasa, hornblenda, biotita, clorita, circón y opacos son los minerales constituyentes. En la matriz, el cuarzo aparece en pequeños granos alargados, con o sin subgranos y bandas de deformación. Algunos granos mayores están recrystalizados a nuevos granos menores, en general concentrados en los bordes.

La plagioclasa aparece como granos alargados con extinción ondulatoria y algunos subgranos y nuevos granos recrystalizados en los bordes, así como más de un sistema de maclas como resultado de la asimilación de parte de la deformación. La saururización de los granos ocurre en los bordes y en fracturas.

La hornblenda aparece en la forma de prismas alargados. Granos enteros o porciones de estos están sustituidos por actinolita + clorita, lo que ocurre con mayor intensidad cerca de las fracturas, que a su vez están rellenas principalmente por clorita y minerales opacos.

La biotita es rara y en general está asociada con un estado de alteración de la hornblenda, presenta pleocroísmo de rojo oscuro a marrón.

Gneis con piroxeno (GRM-4)

La mineralogía básica de esta roca es: clinopiroxeno, hornblenda, plagioclasa, cuarzo, apatito y opacos. La foliación está marcada por plagioclasa, hornblenda y clinopiroxeno. El contacto entre clinopiroxeno y cuarzo es normal. El clinopiroxeno presenta texturas de exsolución que pueden estar deformadas o curvadas. La hornblenda aparece fracturada cuando está substituida por clorita. La plagioclasa presenta subgranos y más de un sistema de maclas.

Gneises granatíferos (GRM-8 y 10)

Estas rocas se componen de cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, granate, biotita, y minerales opacos. La fo-

liación está definida por granos y agregados de granos de cuarzo alargados, alternados con granos alargados de ortoclasa y, en menor cantidad, plagioclasa. Los granos de granate están dispersos en la roca, entretanto los porfiroblastos están concentrados en zonas ricas en feldespatos, los cuales están bordeando los granates. En estas áreas la cantidad de biotita también es mayor y puede ocurrir como inclusiones o en los bordes del granate. El granate presenta algunas fracturas donde está substituido por clorita.

El cuarzo forma granos xenoblásticos alargados con la presencia en su interior de subgranos, bandas de deformación, extinción ondulatoria y a veces asociado con granos nuevos de menor tamaño.

La ortoclasa posee extinción ondulatoria, subgranos y exsoluciones en la forma de gotas alargadas.

La plagioclasa está bastante saurritizada y subordinada a la ortoclasa, siendo comúnmente substituida por mirmequita cuando está en contacto con la ortoclasa.

La biotita presenta pleocroísmo variando entre rojo y marrón oscuro, con algunos granos substituidos por un intercrecimiento de mica blanca y clorita.

Granulitas s.s. (GRM-9)

Son estas las rocas que caracterizan a las Granulitas de los Mangos; se componen de cuarzo, granate, ortopiroxeno, biotita, mesopertita, plagioclasa, apatito, circón y minerales opacos. Es una granulita con la foliación definida por los prismas alargados de ortopiroxeno, agregados alargados de granos de cuarzo y feldespatos y por biotita orientada.

En general, el cuarzo forma granos xenoblásticos bastante alargados formando cintas, estas pueden presentarse interligadas por ramificaciones y en su interior es común la ocurrencia de subgranos y bandas de deformación.

El ortopiroxeno está alterado a un material microcristalino de color marrón y birrefringencia alta.

El granate ocurre como porfiroblastos xenomórficos con muchas inclusiones de plagioclasa, cuarzo y biotita.

La biotita es rara en la matriz, estando en general asociada al ortopiroxeno o a minerales opacos.

Paragénesis e implicaciones metamórficas

Algunas asociaciones minerales presentes en las rocas que componen las Granulitas de Los Mangos posibilitan la caracterización petrográfica de esta unidad,

lo cual se constituye en un aporte más de este trabajo. Las siguientes paragénesis fueron observadas en las muestras,

1. Anfibolita: hornblenda + plagioclasa + biotita + cuarzo + minerales opacos,
2. Gneis bandeado:
 - Banda 1: cuarzo + plagioclasa + ortoclasa peritítica + biotita + hornblenda,
 - Banda 2: cuarzo + plagioclasa + hornblenda + biotita,
3. Gneis con piroxeno: clinopiroxeno + hornblenda + plagioclasa + cuarzo,
4. Gneis granatífero: cuarzo + ortoclasa + granate + biotita + plagioclasa,
5. Granulita: cuarzo + granate + ortopiroxeno + biotita + mesopertita + plagioclasa.

Las paragénesis 1 y 2 indican condiciones mínimas de *P* y *T* de la facies anfibolita pero también son estables en las condiciones de la facies granulita (Turner 1981, Yardley 1989, Spear 1993). Por lo tanto, no ayudan a demarcar las condiciones del pico del metamorfismo.

Las paragénesis 3, 4 y 5 son típicas de la facies granulita (Turner 1981, Yardley 1989, Spear 1993). En la paragénesis 3, la asociación de clinopiroxeno + cuarzo, es indicativa de condiciones de la facies granulita (Green & Ringwood, 1967). En la paragénesis 4 la asociación de cuarzo, ortoclasa, granate y biotita sin la presencia de moscovita indica condiciones mínimas de facies granulita, con producción de granate + ortoclasa + fundido probablemente a través de la descomposición de la biotita. La ausencia de silimanita y cordierita en la roca debe estar ligada a una composición pobre en Al y Mg.

La paragénesis 5 es típica de la facies granulita en virtud de la presencia de ortopiroxeno + granate + mesopertita ± biotita, y probablemente generada por una reacción de descomposición de la biotita (Clemens & Droop 1998, Spear *et al.* 1999).

La presencia de saurritización en la plagioclasa, así como la alteración de la biotita y hornblenda a clorita y clorita + actinolita respectivamente, indican que el retrometamorfismo ocurrió en condiciones de facies anfibolita baja a esquisto verde (Turner 1981, Yardley 1989, Spear 1993).

Relación de las texturas, microestructuras y metamorfismo

En general, el cuarzo se presenta en forma de granos alargados generando cintas de cuarzo, que pueden presentar ramificaciones que se conectan con cintas paralelas. En el interior de las cintas es común la presencia de subgranos y bandas de deformación. La ocurrencia de cuarzo en cintas indica que las condiciones de temperatura durante el metamorfismo fueron elevadas al punto que el mecanismo de migración de límite de grano generó granos bastante grandes en la roca (McLelland 1984, Knipe & Wintsch 1985, Lucas 1990), ésto es facilitado en condiciones de la facies granulita. Por otro lado, la presencia de subgranos y bandas de deformación al interior de las cintas de cuarzo indican que hubo deformación a temperaturas más bajas, alrededor de 400 °C (Kruhl 1986). Esa deformación tardía puede estar ligada al levantamiento de las rocas o a un metamorfismo o retrometamorfismo posterior, ligado con algún evento metamórfico andino.

La presencia de subgranos y bandas de deformación en el cuarzo es una característica bastante penetrativa, sugiriendo que esta deformación, posterior al pico del metamorfismo, fue relativamente intensa. De este modo, no fue posible reconocer posibles texturas o microestructuras ígneas en las rocas en donde ocurren bandas constituidas por cuarzo y feldespatos (McLellan 1983, Vernon & Collins 1988, Vernon 1999), lo que impide a partir de la petrografía, definir si estas bandas eran o no antiguos leucosomas.

La formación de subgranos en los feldespatos indica temperaturas mínimas de deformación cercanas a 500 °C. También se pueden inferir temperaturas elevadas, cercanas a 600 °C con base en la deformación dúctil del clino-

piroxeno, lo que está en acuerdo con las microestructuras presentes en los granos de hornblenda (Allison & La Tour 1977, Brodie & Rutter 1985).

Geoquímica Isotópica y Geocronología

Los estudios isotópicos Sm y Nd fueron realizados en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Brasilia, siguiendo la metodología descrita por Gioia & Pimentel (2000). Después de obtener concentrados de Sm y Nd por cromatografía de cambio iónico, se efectuaron los análisis en un modo estático usando un espectrómetro de masa multi-colector Finnigan MAT-262. Las concentraciones de Sm y Nd fueron obtenidas por dilución isotópica utilizando un *spike* ^{149}Sm - ^{150}Nd . La razón isotópica de Nd fue normalizada con el valor $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. La incertidumbre 1s para la razón $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ es menor que 0.005%.

La constante de decaimiento usada es la recomendada por Steiger & Jäger (1977) y las edades obtenidas presentan un intervalo de confianza del 95%. Durante el período en que se realizaron los análisis el patrón LaJolla de Nd presentó valores promedio de 0.511835 ± 14 , el cual, considerando la incertidumbre, es el mismo recomendado por la USGS de 0.511860 (Govindaraju, 1994).

Con los datos isotópicos Sm-Nd para 3 muestras de Las Granulitas de Los Mangos y a partir de la roca total (RT) y del análisis de un concentrado de granate fue posible obtener una edad isocrónica Sm-Nd (Tabla 1 y Fig. 2). Adicionalmente, los valores de Sm-Nd permitieron calcular las edades modelo (T_{DM}) y los valores respectivos de e_{Nd} .

La edad modelo T_{DM} , interpretada como la edad de residencia cortical para un material, fue obtenida a partir

Tabla 1. Datos Sm-Nd de las Granulitas de Los Mangos. Incertidumbres 1s en la razón $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ son menores que 0.003% y para la razón $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ menor que 0.1%. El valor $e_{\text{Nd}(T)}$ fue calculado utilizando la edad isocrónica Sm-Nd de 971 Ma.

Muestra	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{m}}$	$e_{\text{Nd}(971 \text{ Ma})}$	T_{DM} (Ga)
GRM-1 Anfibolita	5.18	22.52	0.512290 ± 12	0.1391	0.37	1.52
GRM-2 Gneis bandeado	6.15	39.56	0.511882 ± 15	0.0940	-1.99	1.47
GRM-10 (RT) Gneis granatífero	9.26	44.48	0.511930 ± 11	0.1259	-5.02	1.92
GRM-10 (Gr) Granate	8.47	5.02	0.517620 ± 15	1.0195		

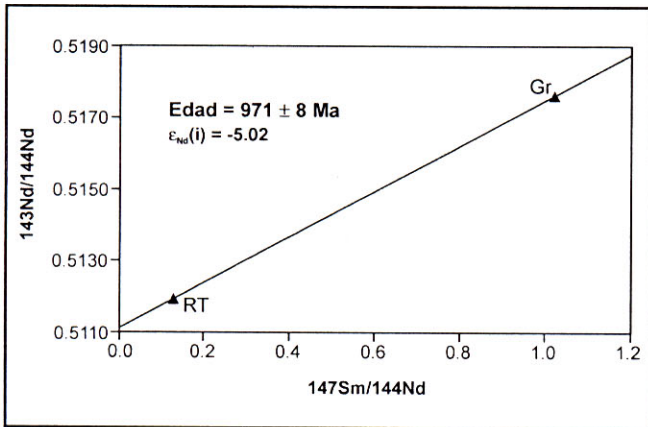


Figura 2. Isócrona Sm-Nd con el par Granate (Gr) y Roca Total (RT), para una muestra de las Granulitas de Los Mangos.

del intercepto entre la línea de evolución de la muestra con la curva de evolución del manto empobrecido (DM), esta última determinada a partir de la ecuación de DePaolo (1981): $0.25T^2 - 3T + 8.5$ (Fig. 3).

El valor de Epsilon de Neodimio (ϵ_{Nd}) en el tiempo "t" se obtuvo utilizando la ecuación de DePaolo & Wasserburg (1976): $\epsilon_{Nd} = [\{ (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{im} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{CHUR-t} \} - 1] \times 10^4$, con valores para el CHUR (*chondritic uniform reservoir*) de: $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{CHUR} = 0.512638$ y $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{CHUR} = 0.1967$.

Las muestras analizadas corresponden a 3 de las asociaciones más abundantes presentes en la secuencia bandeada de los ríos Guatapurí y Mangos. La muestra GRM-1 (anfíbolita) presenta los contenidos más bajos de Sm y Nd, lo cual es compatible con su carácter de roca

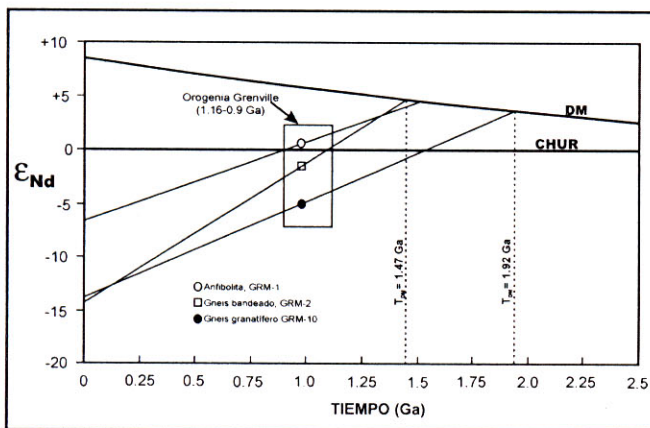


Figura 3. Diagrama $\epsilon_{Nd}(T=971 \text{ Ma})$ vs. tiempo para las Granulitas de Los Mangos.

básica. El gneis granatífero (GRM-10), presenta los más altos valores en las concentraciones de Sm y Nd, siendo el reflejo de su composición más cortical. Ya la muestra GRM-2, la cual corresponde a la banda 1 descrita para los gneises bandeados, tiene valores intermedios, comparada con las anteriores.

Las edades modelo T_{DM} calculadas para estas rocas dan valores entre 1.47 y 1.92 Ga, lo que sugiere que los protolitos de la secuencia vulcano-sedimentaria son tan antiguos como 1.9 Ga.

A partir de la muestra GRM-10 fue posible obtener un concentrado de granates, los cuales se separaron en la lupa y se escogieron aquellos que no contenían inclusiones o impurezas. Con los datos isotópicos de Sm y Nd para la roca total (RT) y los granates (Gr) fue posible obtener una edad isocrónica de $971 \pm 8 \text{ Ma}$ (Fig. 2). Este valor es interpretado como la edad del metamorfismo de facies granulita responsable por la formación de estas rocas y asociado cronológicamente con la orogenia Grenville

Los valores de ϵ_{Nd} , calculados para la edad de 971 Ma, están entre +0.37 y -5.02 y sugieren que para este momento los materiales que fueron sometidos al metamorfismo de la facies granulita, tenían asignatura isotópica Sm-Nd que indicaba la presencia de fuentes primordialmente corticales (muestras GRM-2 y 10) y en menor proporción la participación de materiales del tipo manto derivado (muestra GRM-1).

Discusión y Conclusiones

Las rocas de alto grado metamórfico (granulitas de Los Mangos) que afloran en las riberas de los ríos Guatapurí y Mangos se constituyen en el basamento de la porción oriental de la SNSM y más específicamente de la llamada provincia Sierra Nevada. Es una secuencia de rocas bandeadas, en donde predominan: anfíbolitas, gneises bandeados, gneises con piroxeno, gneises granatíferos y granulitas. El bandeamiento composicional que se observa a lo largo de los afloramientos es el reflejo de la estructura original de su protolito y la intercalación de bandas máficas, félsicas y localmente bandas calcáreas, lo que sugiere un origen vulcano-sedimentario para la secuencia. Esta estructura bandeada es común en otras metamorfitas de medio a alto grado que afloran en Colombia como es el caso de las rocas de los macizos de Garzón y Santander (Ward *et al.*, 1973; Kroonenberg, 1982; Restrepo *et al.*, 1997).

Las asociaciones minerales confirman que la secuencia fue afectada por un evento metamórfico de alto grado,

el cual alcanzó la facies granulita. Se destaca la presencia de rocas con ortopiroxeno-granate-mesopertita, ortoclasa-granate-biotita, clinopiroxeno-cuarzo, que determinan condiciones de facies granulita. Asociaciones de alto grado fueron descritas por **Kroonenberg** (1982), para el macizo de Garzón. Por otro lado, en el macizo de Santander las asociaciones minerales han permitido establecer condiciones de facies anfibolita alta para las rocas metamórficas bandeadas (**Ward et al.**, 1973).

El alto grado metamórfico determinado para estas unidades junto a la estructura bandeada posibilita el establecimiento de una correlación entre ellas. Esta correlación ha sido propuesta y en parte confirmada a partir de los datos geocronológicos disponibles para estas unidades, los cuales apuntan hacia la presencia de un evento metamórfico entre 1.1 y 0.9 Ga (**Ward et al.**, 1973; **Tschanz et al.**, 1974; **Álvarez**, 1981; **Álvarez & Linares** 1984; **Priem et al.**, 1989; **Restrepo et al.**, 1997).

Kroonenberg (1982), ya había propuesto esta correlación y agrupó este conjunto de rocas en el denominado cinturón granulítico Garzón-Santa Marta. Según el autor, estas rocas fueron generadas por un evento orogénico tipo Grenville (1100-900 Ma), similar al registrado en la parte oriental de Norte América. Posteriormente, **Toussaint** (1993) y **Restrepo et al.** (1997) se adhieren a lo propuesto por **Kroonenberg** (1982) e indican que existen evidencias claras de que la colisión entre Norte y Suramérica, hace ~1.1 Ga fue la responsable por la génesis de estas unidades.

Los datos isotópicos Sm-Nd presentados en este estudio son compatibles con esta propuestas y confirman la existencia de un ambiente geológico grenvilliano como responsable por la génesis de estas rocas. Las Granulitas de Los Mangos, presentan valores T_{DM} entre 147 y 192 Ga y valores $e_{Nd}(T=971 \text{ Ma})$ entre +0.37 y -5.02 (Fig. 3). Los datos indican que al momento de la orogenia Grenville, parte de las fuentes que originaron estas rocas tenían edades de hasta 1.92 Ga y que a pesar de tener un carácter cortical, es evidente la presencia de material manto derivado o con poca residencia cortical, como lo indica el valor $e_{Nd}(T=971 \text{ Ma})$ levemente positivo de la muestra de anfibolita.

Datos semejantes fueron obtenidos por Ruiz *et al.* (1988) en rocas grenvillianas de México, interpretados como el producto de una mezcla de corteza continental, con edad media de 1.9 Ba, y entre 70% y 90% de material manto derivado generado durante la orogenia Grenville. La presencia de material juvenil durante el evento Grenville es también evidente en la zona de Garzón, en donde **Priem et al.** (1989), obtuvieron valores <0.704 en

la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial, para las rocas del macizo de Garzón (gneises y granulitas), valor que indica una corta residencia cortical para los protolitos que generaron estas rocas. Considerando lo anterior, se sugiere que las rocas grenvillianas de Colombia representan ciertamente material manto derivado generado hace ~1.0 Ga o de poca residencia cortical, el cual se mezcló con material cortical con edades de hasta 1.9 Ga.

El valor Sm-Nd de $971 \pm 8 \text{ Ma}$, es la edad del metamorfismo grenvilliano de alto grado responsable por la formación de las Granulitas de Los Mangos. Este valor es el mismo obtenido por **Tschanz et al.** (1974) por el método K-Ar sobre un gneis correlacionable con la secuencia tipo de los ríos Guatapurí y Mangos. A partir de esto se confirma que las metamorfitas de alto grado que afloran en la SNSM son parte de una misma unidad la cual aparece desmembrada principalmente a causa de la intrusión de los granitoides jurásicos. La edad de $971 \pm 8 \text{ Ma}$ es igualmente semejante a las obtenidas para las rocas de los macizos de Garzón y Santander, validando las propuestas de correlación que se han planteado entre estas unidades.

Edades asociadas al evento Grenville, como la obtenida para las granulitas de Los Mangos (y las rocas correlacionables de Colombia), han sido reportadas más al sur, en el macizo peruano de Arequipa, en donde **Wasteneys et al.** (1995) registran edades U/Pb de 970 Ma, igualmente interpretadas como asociadas al evento de colisión entre Laurentia y el Cratón Amazónico en el periodo entre 1110-900 Ma.

Con ello, las Granulitas de Los Mangos se constituyen en la exposición más septentrional, en Suramérica, de rocas precámbricas de alto grado las cuales fueron generadas durante la orogenia Grenville. Sin embargo, persiste la incógnita respecto al tipo de estructura que liga a estas rocas con las otras unidades precámbricas de los Andes colombianos y las cuales están geográficamente separadas. No existe, o no está disponible, información del subsuelo que permita plantear la existencia de un cinturón continuo Garzón-Bucaramanga-Santa Marta, como lo sugiere por **Kroonenberg** (1982) o que, por el contrario, cada macizo y las rocas de alto grado que lo constituyen sean parte de bloques independientes que se han adherido a la parte noroeste de Sudamérica por procesos asociados a la dinámica de colisión de terrenos.

Agradecimientos

Para la realización de este estudio se contó con la colaboración de la Facultad de Minas de la Universidad

Nacional de Colombia - Sede Medellín, del Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia y el apoyo financiero del CNPq y CAPES de Brasil. Agradecimientos especiales a los profesionales: Flor Patricia Ángel C., Edgar Franco C., Simone M. Gioia, Jorge Julián Restrepo A. y Humberto González I., por la colaboración y discusión de asuntos relacionados con la problemática geológica de Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Allison I. S. & La Tour T. E. (1977). Brittle deformation of hornblende in a mylonite; A direct geometrical analogue of ductile deformation by translation gliding. *Canadian Journal of Earth Science*, **14**: 1953-1959.
- Álvarez J. (1981). Determinación de edad Rb/Sr en rocas del Macizo de Garzón, Cordillera Oriental de Colombia. *Geología Norandina*, **4**: 31-38.
- & Linares E. (1984). Una edad K/Ar del Macizo de Garzón, departamento del Huila (Colombia). *Geología Norandina*, **9**: 31-38.
- Brodie K. H. & Rutter E. H. (1985). On the relationship between deformation and metamorphism, with special reference to the behaviour of basic rocks. In: Thompson, A.B. & Rubie, D.C. (eds.) *Metamorphic reactions – kinetics, textures and deformation*. Advances in Physical Geochemistry. Volume 4. Springer Verlag, New York, p: 138-179.
- Clemens J. D. & Droop G. T. R. (1998). Fluids, P-T paths and the fates of anatectic melts in the Earth's crust. *Lithos*, **44**: 21-36.
- DePaolo D. J. (1981). Neodymium isotopes in The Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, **291**: 193-196.
- & Wasserburg G. J. (1976). Nd isotopic variations and petrogenetic models, *Geophysical Research Letters*, **3**(5): 249-252.
- Gansser A. (1955). Ein Beitrag zur Geologie und Petrographie der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien Sudamerika): Schweizer. Mineralog. U. Petrol. Mitt., v. **35** (2): 209-279.
- Gioia S. M. C. & Pimentel M. M. (2000). The Sm-Nd isotopic method in the Geochronology Laboratory of the University of Brasilia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**(2): 219-245.
- González H., Núñez A. & G. Paris (1988). Mapa geológico de Colombia, escala 1:1.500.000, memoria explicativa. Ingeominas, 46-49.
- Govindaraju K. (1994). Compilation of working and sample description for 383 geostandards. *Geostand Newslett (special issue)*, **18**:1-158.
- Green D. H. & Ringwood A. E. (1967). An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **31**: 767-833.
- Knipe R. J. & Wintsch R. P. (1985). Heterogeneous Deformation, foliation development and metamorphic processes in a poly-phase mylonite. In: Thompson, A.B. & Rubie, D.C. (eds.) *Metamorphic reactions – kinetics, textures and deformation*. Advances in Physical Geochemistry. Volume 4. Springer Verlag, New York, p: 180-210.
- Kroonenberg S. B. (1982). Litología, metamorfismo y origen de las granulitas del macizo de Garzón, Cordillera Oriental (Colombia). *Geología Norandina*, **6**: 40-46.
- (1982a). A Grenvillian granulite belt in the Colombian Andes and its relation with the Guiana Shield. *Geologie en Mijnbouw*, **61**(3): 325-333.
- Kruhl J. H. (1986). Textures and c-axis orientations of deformed quartz crystals from porphyric dikes of the Alpine - Root Zone (Western Alps). *Geologische Rundschau*, **75**: 601-623.
- Lucas S. B. (1990). Relations between thrust belt evolution, grain-scale, and metamorphic processes: Cape Smith Belt, northern Canada. *Tectonophysics*, **178**: 151-182.
- MacDonald W. D. & Hurley P. M. (1969). Precambrian gneisses from northern Colombian, South America. *Geological Society of America Bulletin*, **80**: 1867-1872.
- McLellan E. L. (1983). Contrasting textures in metamorphic and anatectic migmatites: an example from the Scottish Caledonides. *Journal of Metamorphic Geology*, **1**: 241-262.
- J. M. (1984). The origin of ribbon lineation within the southern Adirondacks, USA. *Journal of Structural Geology*, **6**: 147-157.
- Ordóñez O., Pimentel M. M., Moraes R. & Restrepo J. J. (1999). Rocas Grenvillianas en la región de Puerto Berrio-Antioquia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **23**(87): 225-232.
- Priem H. N. A., Kroonenberg S. B., Boelrijk N. A. I. M. & Hebeda E. H. (1989). Rb-Sr and K-Ar evidence for the presence of a 1.6 Ga basement underlying the 1.2 Ga Garzón-Santa Marta granulite belt in the Colombia Andes. *Precambrian Research*, **42**: 315-324.
- Restrepo P. A., Ruiz J., Gehrels G. & Cosca, M. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters*, **150**: 427-441.
- Ruiz J., Patchett J. & Ortega-Gutiérrez F. (1988). Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of Mexico from Nd isotopic studies. *Geological Society of America Bulletin*, **100**: 274-281.
- Spear F. S. 1993. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Mineralogical Society of America Monograph. Chelsea, Michigan, p 799.
- , Kohn, M. J. & Cheney, J. T. (1999). P-T paths from anatectic pelites. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **134**: 17-32.
- Steiger R. H. & Jäger E. (1977). Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo - and cosmochronology. *Earth and Planetary Sciences Letters*, **36**: 359-362.
- Toussaint J. F. (1993). *Evolución Geológica de Colombia, Precámbrico y Paleozoico*. Univ. Nacional de Colombia. Medellín, 129p.
- Tschanz C., Jimeno A. & Cruz B. J. (1969). *Geology of the Santa Marta área (Colombia)*. Instituto de Investigaciones Geológico Mineras, Informe 1829, 288pp.

- _____, **Richard F. M., Cruz B. J., Harald H. M. & Gerald T. C.** (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, **85**: 273-284.
- Turner F. J.** 1981. *Metamorphic Petrology - mineralogical, field and tectonic aspects*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Vernon R. H.** (1999). Quartz and feldspar microstructures in metamorphic rocks. *The Canadian Mineralogist*, **37**: 513-524.
- _____ & **Colins W. J.** (1988). Igneous microstructures in migmatites. *Geology*, **16**: 1126-1129.
- Vesga, C. J. & Barrero D.** (1978). Edades K/Ar en rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera Central de Colombia y su implicación geológica. - II Congreso Colombiano de Geología, libro de resúmenes, Bogotá.
- Ward E. D., Goldsmith R., Cruz B. J. & Restrepo A. H.** (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. *Boletín Geológico, Ingeominas*, **21**(1-3): 1-132.
- Wasteneys H. A., Clark A. H., Farrar E. & Langridge R. J.** (1995). Grenvillian granulite-facies metamorphism in the Arequipa massif, Peru: a Laurentania - Gondwana link. *Earth and Planetary Science Letters*, **132**: 63-73
- Yardley B. W. D.** 1989. *An introduction to Metamorphic Petrology*. Longman Earth Science Series. Singapore, 248 pp.