

# CARTOGRAFÍA, PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE GRANULITAS BÁSICAS EN EL SEGMENTO NORTE DE LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA, DENOMINADA GRANULITAS DE SAN ISIDRO

## MAPPING, PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF BASIC GRANULITES IN THE NORTHERN SEGMENT OF THE CENTRAL CORDILLERA OF COLOMBIA, TERMED SAN ISIDRO GRANULITES

Gabriel Rodríguez García<sup>1</sup>, Harold Andrés Albarracín Rivera<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Servicio Geológico Colombiano, Medellín, Calle 75 No. 79A-51, teléfono 2644949

Email: grodriguez@sgc.gov.co

<sup>2</sup>OMYA Andina S.A, Departamento de Geología, Autopista Medellín-Bogotá km 30, teléfono 5627676

Email: harold.albarracin@omya.com

---

Rodríguez García, Gabriel & Albarracín Rivera, Harold Andrés (2014): *Cartografía, petrografía y geoquímica de granulitas básicas en el segmento norte de la Cordillera Central de Colombia, denominada Granulitas de San Isidro*. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 37. Bogotá, Colombia. pp 95-110.

Manuscrito recibido: 19 de julio de 2011; aceptado: 12 de abril de 2013.

---

### Resumen

Las Granulitas de San Isidro constituyen un cuerpo de rocas metamórficas de alto grado que aflora en el segmento norte de la Cordillera Central. Corresponde a un cuerpo alargado en sentido Norte-Sur con una extensión aproximada de 14 km<sup>2</sup>, enclavado dentro del Batolito Antioqueño. Tectónicamente la unidad se localiza entre las fallas Otú-Pericos y San Jerónimo.

La unidad está constituida por granulitas básicas olivínicas y con hipersteno, granofelsa básicos de Pl-Ol-Cpx con Hbl, anfibolitas con cummingtonita-clinopiroxeno, granofelsa y neises de Qtz+Pl+Bt±Grt±, Fk±Ms±Sill, con estructuras metamórficas migmatíticas de tipo nebulítica, schlieren y estratificada.

Químicamente los protolitos se clasifican como basaltos y picrobasaltos de afinidad subalcalina y tendencia toleítica; la mayoría de las muestras se localizan en el campo de los basaltos de arco toleítico. Corresponden a magmas básicos y ultrabásicos con empobrecimiento en las tierras raras pesadas y elementos trazas incompatibles.

**Palabras clave:** basalto, E-MORB, granulita, granofelsa, N-MORB, petrografía

### Abstract

The San Isidro Granulites are high temperature metamorphic rocks which crop out on the northern segment of the Central Cordillera. It is found as enclaves within the Batolito Antioqueño. The body extends from north to south covering approximately 14 km<sup>2</sup>. Tectonically, the unit is found between the Otú-Pericos and San Jerónimo Faults.

The unit comprises basic olivine granulites and hypersthene granulites, basic granofels of Pl-Ol-Cpx with Hbl, cummingtonite-clinopyroxene amphibolites, granofels and gneisses of Qtz+Pl+Bt ± Grt, Fk, Ms, Sill, with nebulite, schlieren and layered migmatite structures.

Chemically, the protholites are classified as basalts and picrobasalts of sub-alkaline affinity and tholeiitic tendency; the majority of the samples are fall in the arc basalts field. They correspond to basic and ultrabasic magmas with impoverishment on the heavy rare earth elements and incompatible trace elements.

**Key words:** basalt, E-MORB, granulite, granofels, N-MORB, petrography

## INTRODUCCIÓN

En el año 2009, INGEOMINAS adelantó un proyecto de cartografía geológica que permitió el reconocimiento de una nueva unidad litológica constituida por granulitas básicas, granofelsa, neises cuarzo feldespáticos y granitos que se agrupan bajo el nombre de Granulitas de San Isidro.

## MARCO GEOLÓGICO

La Cordillera Central, en su segmento norte, está conformada principalmente por rocas metamórficas que van desde esquistos, neises y localmente granulitas, intruidas por plutones intermedios de edades Triásicas a Paleocenas. Las edades reportadas para las rocas metamórficas indican dos eventos metamórficos, uno Devónico Carbonífero y el otro Permo-Triásico (Restrepo et al. 1991; Vinasco et al. 2006).

Las rocas metamórficas del segmento Norte de la Cordillera Central han sido agrupadas de varias maneras: cerca a Medellín como Grupo Ayurá – Montebello (Botero 1963) o como Complejo El Retiro (Rodríguez et al. 2005, 2008); de manera regional como Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Restrepo & Toussaint 1984) o como Complejo Cajamarca (Maya & González 1995). Estas agrupaciones que presentan como límites tectónicos las fallas Otú-Pericos al oriente y San Jerónimo al occidente (Figura 1).

Al norte de la Cordillera Central, se conocen cuatro afloramientos de granulitas, incluyendo las de San Isidro (Albarracín y Rodríguez, 2011), en las siguientes localidades: granulitas básicas en el Retiro relacionadas a neises miloníticos del Neis de La Ceja, en el sentido de Rodríguez et al. (2005, 2008); granulitas asociadas al Complejo de Puqui que corresponden a granulitas básicas, neises biotíticos con ortopiroxeno, granulitas ácidas con ortopiroxeno, stocks graníticos y xenolitos básicos con ortopiroxeno (González 1993); y las Granulitas de Pantanillo denominadas inicialmente como anfibolitas (Mejía 1984) y descritas por Geostudios-Ingeominas (2005) y Rodríguez et al. (2012), localizadas cerca de Santa Fe de Antioquia, al occidente de la falla de San Jerónimo, dentro del Batolito de Sabanalarga.

## MÉTODOS Y MATERIALES

Se recolectaron 20 muestras de roca, representativas de esta unidad, que no presentarán un alto grado de alteración y meteorización que afectara la composición química original.

En total, se realizaron 13 secciones delgadas, las cuales se analizaron petrográficamente; éstas se clasificaron principalmente como granulitas básicas y como granofelsa cuarzo feldespático. Esta clasificación se realizó según las recomendaciones de la Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR). Sin embargo, en este trabajo se empleará el término “granulitas básicas” para las rocas metamórficas de alto grado en las cuales dominan los silicatos de Fe-Mg. De igual manera, en la identificación de estructuras, texturas y microestructuras se emplearon como guías a Vernon (2004) y Winter (2001).

Para las abreviaciones de los minerales, se siguió la tabla recomendada por la SCMR (Fettes & Desmons 2007) y así mantener la unidad de los términos empleados en el presente trabajo.

Se seleccionaron 6 muestras de granulitas básicas y 8 de anfibolitas para litogeoquímica de roca total. Estas se prepararon en el laboratorio ActLabs en Canadá. La determinación cuantitativa de los óxidos mayores, de algunos elementos traza y de las tierras raras se obtuvo por el método de ataque Fus-ICP (Lithium Metaborate / Tetraborate Fusion ICP) y para el resto por espectrometría de emisión con plasma (ICP-MS).

## DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

Las Granulitas de San Isidro reciben su nombre del cerro San Isidro. Están constituidas en el costado occidental y sobre el cerro San Isidro por granulitas básicas (PRgb), y en el costado oriental por intercalaciones de granulitas básicas con neises biotíticos y granofelsa biotítico; al oriente del cuerpo por granofelsa cuarzo feldespático y granitos rosados de origen metamórfico (PRga). Las mejores exposiciones se presentan entre las partidas a la vereda La Cejita y la vereda Las Ánimas, y en la vía que conduce desde el corregimiento Río Grande bordeando el río Grande hasta la vereda Bella Vista, un kilómetro aguas abajo de la desembocadura de la Quebrada Mocerongo en el río Grande (Figura 2).

Se trata de un cuerpo alargado en sentido Norte-Sur con una extensión aproximada de 14 km<sup>2</sup> (Figura 2). Tectónicamente la unidad se localiza entre las fallas Otú-Pericos y San Jerónimo en el sentido de Maya y González (1995).

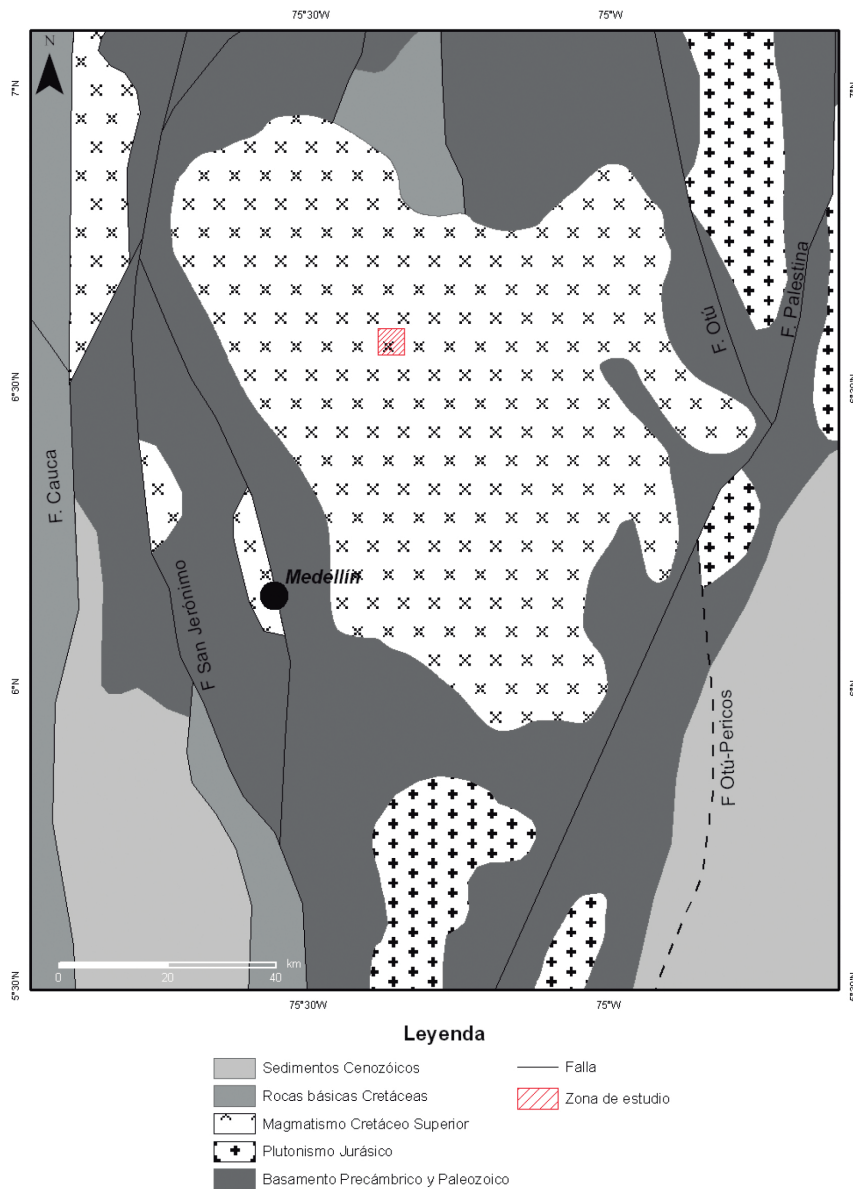
Granulitas básicas. Estas rocas son de color negro, grises moteadas de blanco, masivas o con estructuras migmatítica nebulítica, schlieren, homófonas y

estratificada (Figura 3), generalmente no muestran orientación mineral definida o es débil, localmente tienen bandeado con cambios en el tamaño de los cristales y cambios composicionales en los contenidos de minerales máficos y félsicos. Además, presentan segregaciones pegmatíticas de minerales máficos mayores a un centímetro.

Las granulitas poseen textura granoblástica, similar a la textura granular de las rocas ígneas gabroides, son homogéneas en composición y textura, con variaciones locales del tamaño de los cristales, desde fanerítica muy

fina a pegmatítica y con plagioclasa de color pardo oscuro en la roca fresca.

Los neises, granofelsas y granitos son de colores rosados y blanco amarillentos, faneríticos de grano medio con texturas granulares-granoblásticas y granolepidoblásticas, con orientación de láminas de biotita y elongación de los minerales félsicos. Cerca a la transición con las granulitas básicas se presentan neises con estructuras migmatíticas que gradan, hacia el oriente, a granofelsas y granitos blancos y rosados masivos.



**Figura 1.** Mapa geológico regional simplificado (Modificado de Restrepo et al. 2011).

**Figure 1.** Simplified regional geologic map (Modified from Restrepo et al. 2011)

Las rocas se clasificaron como granulitas básicas, gabronoritas piroxeno hornbléndicas, granofelsa básicos de Pl-Ol-Cpx con Hbl, anfibolitas con cummingtonita-clinopiroxeno, granofelsa y neises de Qtz+Pl+Bt ± Grt, Feld, Ms, Sill.

Las granulitas básicas se distribuyen hacia el norte del cuerpo, y las anfibolitas con clinopiroxeno y cummingtonita retrogradada, hacia el sur del cuerpo. Presentan textura granoblástica con desarrollo de

textura en mosaico, y con contactos poligonales en las plagioclasas; texturas particulares en olivinos como: ameboideas, poiquiloblásticas, coronas de cummingtonita-hornblenda y de hipersteno-hornblenda y coronas simplectíticas menos frecuentes, en el contacto entre olivino y plagioclasa, además, de texturas de crecimientos blásticos de los minerales máficos como olivino, hipersteno, clinopiroxeno y anfíboles, que pueden llegar a ser poiquiloblásticos con inclusiones de plagioclasa (Figura 4).

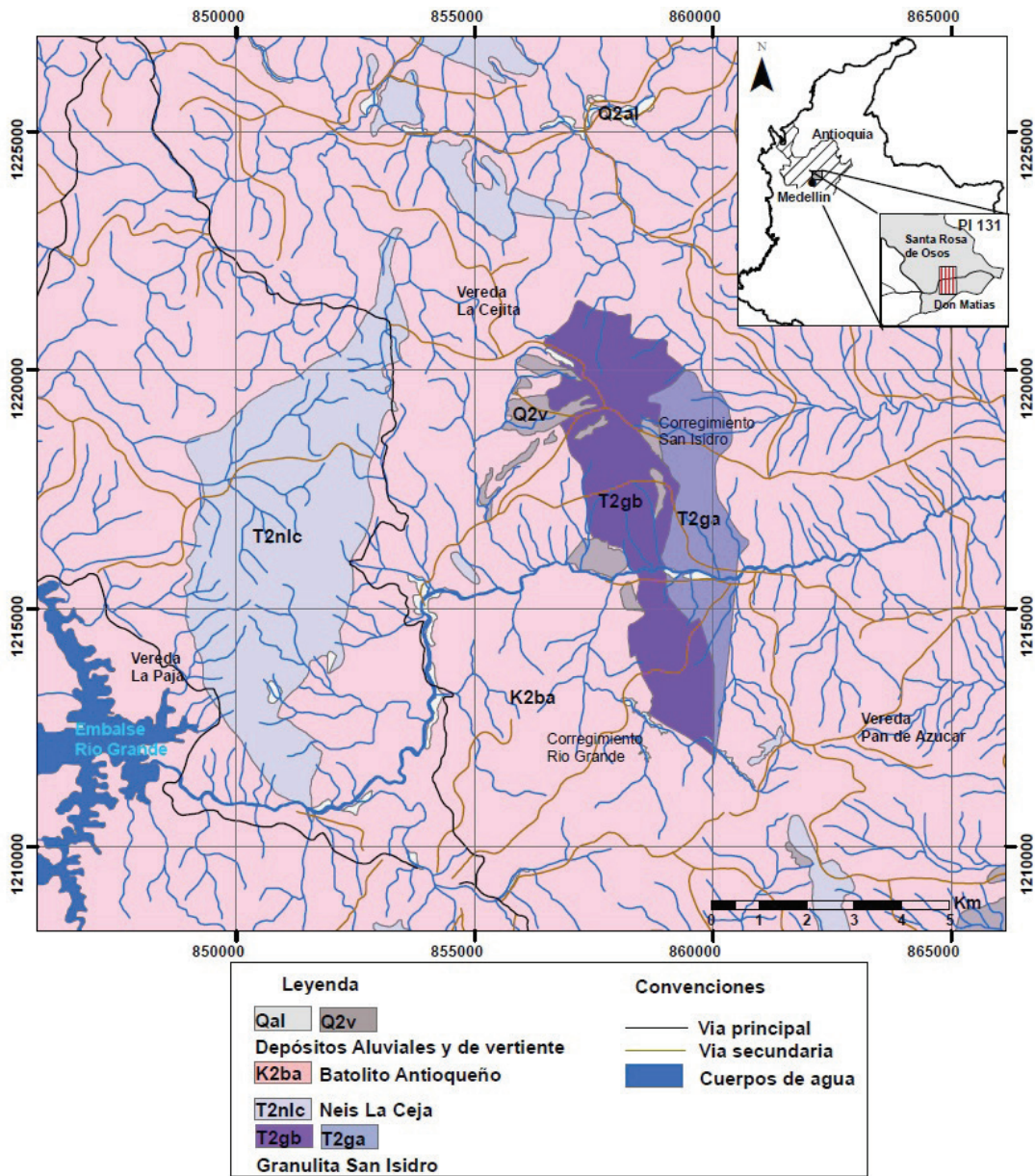


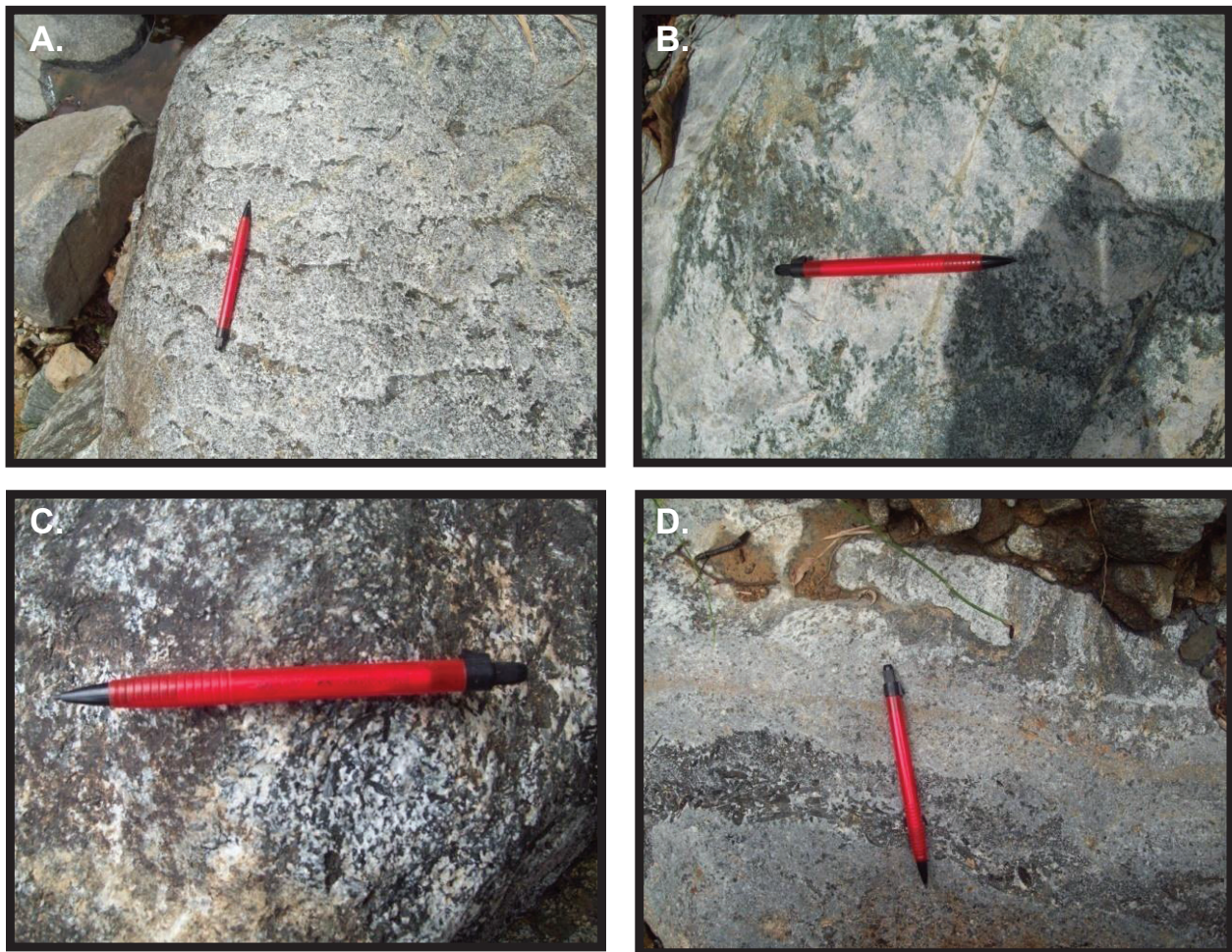
Figura 2. Granulitas de San Isidro (T2gb T2ga) y cuerpos metamórficos cercanos (T2nlc), localizados en el Batolito Antioqueño (K2ba).

Figure 2. San Isidro Granulites (T2gb T2ga) and nearby metamorphic bodies (T2nlc), located in the Antioquia Batholith.



Las granulitas básicas, las granofelsas básicas y las anfibolitas presentan las siguientes asociaciones minerales: 1) plagioclasa – hipersteno – hornblenda – cummingtonita, 2) plagioclasa - olivino – hipersteno – clinopiroxeno ± espinela - anfíbol retrogrado y 3) plagioclasa – hornblenda - cummingtonita ± clinopiroxeno, indicativas de metamorfismo de alta temperatura y baja presión diagnóstica de las facies granulita de dos piroxenos, definida por la aparición de ortopiroxeno y clinopiroxeno con ausencia de cuarzo. La espinela de tipo hercinita sugiere condiciones de baja presión (< 4Kbar) (Bucher & Frey 2002).

Las texturas en corona más frecuentes del núcleo hacia las coronas externas son: 1) núcleo de olivino con corona de hiperstena-cummingtonita-hornblenda, 2) núcleo de olivino con corona de cummingtonita-hornblenda, 3) núcleo de olivino con corona de hornblenda, 4) núcleo de olivino con corona simplectítica de anfíbol, 5) núcleo de hipersteno con corona de cummingtonita-hornblenda, 6) núcleo de hipersteno con corona de hornblenda y 7) núcleo de clinopiroxeno con corona de hornblenda.



**Figura 3.** Aspecto macroscópico de las estructuras migmatíticas. A) y C) estructuras migmatíticas homófonas; B) nebulíticas y D) bandeada de granulitas básicas pertenecientes a las Granulitas de San Isidro.

**Figure 3.** Macroscopic aspect of the structures of the San Isidro Migmatites A), B), C) nebulitic structure, D) layered structure.

La plagioclasa (Figura 4) es de tipo labradorita y bitownita (An<sub>54</sub> a An<sub>70</sub>); se presenta entre el 44% y el 68% en las rocas básicas, en cristales xenoblásticos inequigranoblásticos en mosaicos con contactos poligonales, maclados según albita, albita - Carlsbad y periclina; algunos cristales no tienen desarrollo de maclado. Las plagioclasas son de tamaños entre 0,2 y 1 mm aproximadamente, inalteradas o con leves alteraciones en los bordes y límites de contacto a epidota y zoisita (Figura 4).

El hipersteno (Figura 4) se encuentra desde trazas hasta un 23% en las granulitas básicas. En las granulitas sin olivino se encuentra como cristales xenoblásticos a subidioblásticos, con bordes lobulados y formas ameboideas, de color rosado pálido, con un pleocroísmo amarillo pálido y verde pálido, usualmente con una corona de hornblenda verde en el borde externo y de anfíbol incoloro (cummingtonita) en el borde interno contra el ortopiroxeno, producto de uralitización y retrogradación; además, puede tener alteración a talco secundario en los bordes y anfíbol uralítico fibroso con opacos residuales a lo largo de las fracturas. Tiene inclusiones de plagioclasa y opacos. En las granulitas con olivino, el hipersteno se presenta como corona alrededor de los olivinos y en cristales con contornos lobulados parcialmente reemplazados por anfíbol (Figura 4).

El olivino en las granulitas básicas puede alcanzar el 21% del total de la roca; se presenta en cristales xenoblásticos con contornos lobulados y formas ameboideas, exhibe fracturas irregulares con concentración de magnetita secundaria a lo largo de ellas; generalmente se desarrollan texturas en corona alrededor del olivino con un borde de anfíbol y menos frecuente de hipersteno (estructura kelfítica); además, puede formar una corona simplectítica en el contacto con las plagioclasas. El olivino se altera a iddingsita de color amarillo verdoso, serpentina y magnetita residual que se acumula en las fracturas y bordes de los cristales; tiene inclusiones subredondeadas de plagioclasa, opacos y espinela, y localmente desarrolla texturas poiquiloblásticas con inclusiones de opacos y plagioclasa, muestra crecimiento blástico intergranular entre las plagioclasas y desarrolla texturas en atolón.

El clinopiroxeno es diópsido y se presenta tanto en granulitas básicas como en anfíbolitas diopsídicas, en cantidades menores al 10%, en cristales xenoblásticos con contornos lobulados y formas ameboideas; texturas poiquiloblásticas y en atolón constituidas por inclusiones

subredondeadas de plagioclasa; puede presentar texturas en corona de hornblenda o se transforma a cummingtonita por retrogradación en los bordes y a manera de parches; algunos cristales con maclas dobles y polisintéticas; tiene inclusiones de hipersteno, opacos, espinela y olivino.

El anfíbol predominante es hornblenda, se presenta en las granulitas y anfíbolitas como cristales xenoblásticos inequigranoblásticos, con extinción ligeramente ondulatoria; presenta texturas poiquiloblásticas con inclusiones de plagioclasa, empolvadas por inclusiones de opacos a lo largo del clivaje, puede tener inclusiones de opacos y ortopiroxeno; en algunas rocas se presenta como cristales de crecimiento metamórfico a partir de ortopiroxeno-cummingtonita-anfíbol y olivino-hipersteno-anfíbol, con relictos de piroxeno parcialmente reemplazados y coronas alrededor del olivino. Puede estar alterándose a clorita.

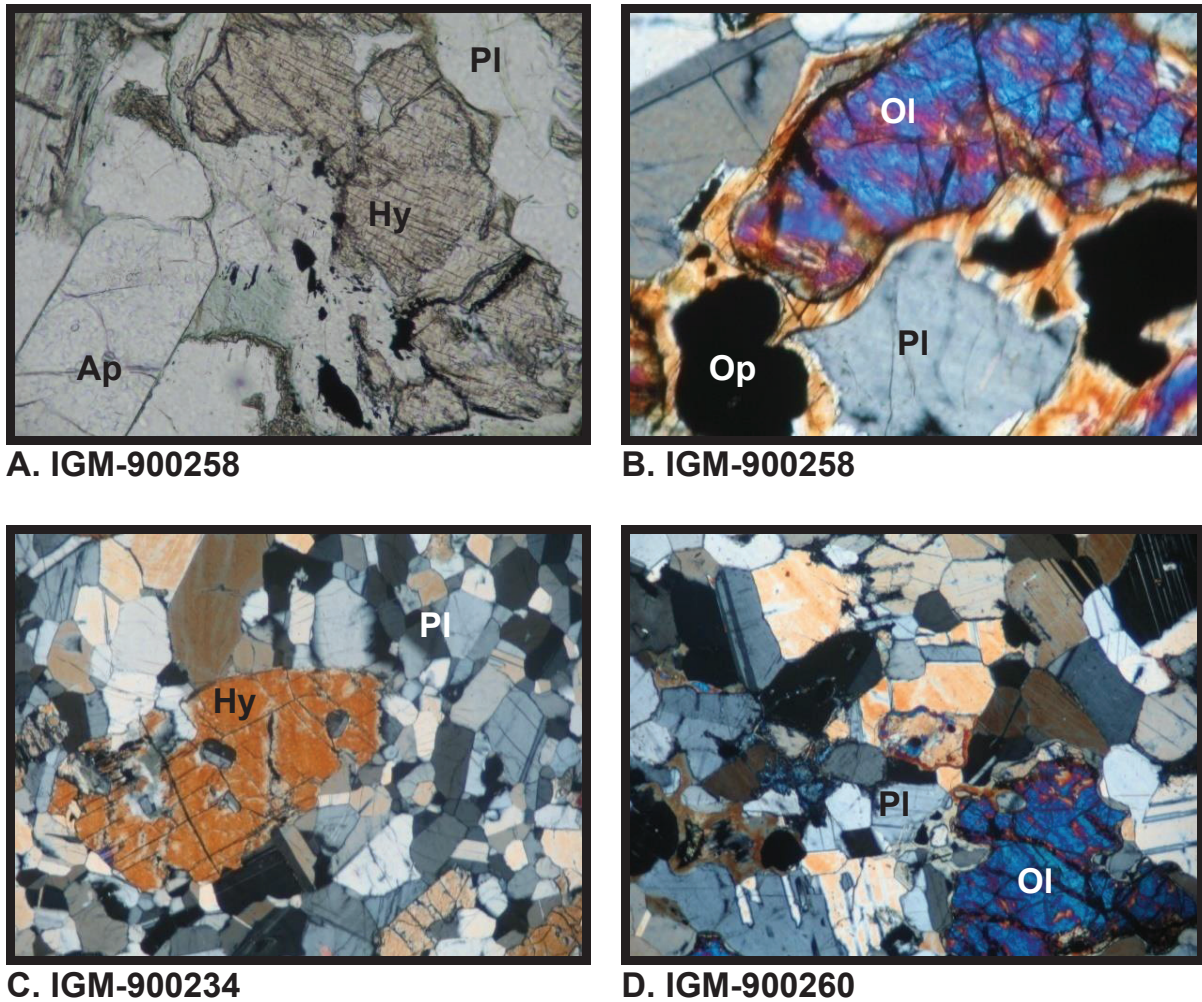
La cummingtonita se presenta en cristales anhedrales incoloros de hábito fibroso y, en algunos casos, prismáticos. Se encuentra intercrecida con cristales de hornblenda y en otros casos como un miembro intermedio del hipersteno → hornblenda/actinolita y a manera de coronas alrededor del olivino y del hipersteno. Estas reacciones se evidencian por la presencia de núcleos de piroxeno dentro de cristales de anfíbol y coronas de cummingtonita-hornblenda y ortopiroxeno-cummingtonita-hornblenda alrededor del olivino.

Como accesorios se encuentra espinela (hercinita) en cristales finos a muy finos, generalmente junto a los opacos o incluidos en éstos, con microfracturas internas irregulares y relieve alto. El apatito puede o no estar presente en cristales xenomórficos localizados entre los mosaicos de plagioclasa.

Los opacos se encuentran en cristales xenoblásticos a subidioblásticos finos, de tamaños entre 0,1 y 0,3 mm, menores a los minerales principales, con los bordes subredondeados a rectos cristalinos, generalmente intersticiales entre los mosaicos de plagioclasa o incluidos en los minerales máficos; pueden estar junto a espinela.

Neises y granofelsa cuarzo feldespáticos. De los granofelsa cuarzo feldespáticos se analizaron tres (3) secciones delgadas, que se colectaron sobre la vía embalse de Río Grande - vereda Mocorongo, considerando este corte el mejor sitio de exposición de estas rocas.





**Figura 4.** Mineralogía y texturas en granulitas básicas del cuerpo de Granulitas de San Isidro. A). (N =) cristal de hipersteno (Hy) con corona de cummingtonita (Cum), junto a plagioclasa (PI) y apatito (Ap). B). (N +) olivino (OI) ameboides con corona de anfíbol junto a opacos (Op) y espinela (Spl). C) (N +) y D). (N +) Aspecto general de una granulita básica, con cristales de hipersteno (Hy) y olivino (OI), junto a mosaico granoblástico de plagioclasa (PI).

**Figure 4.** Mineralogy and textures in basic granulites of the San Isidro Granulites body . A). (N =) hypersthene crystal (Hy) with a cummingtonite (Cum) crown next to plagioclase (PI) and apatite (Ap). B). (N +) olivine (OI) amoeboid with an amphibole crown next to opaque minerals (Op) and spinel (Spl). C) (N +) and D). (N +) General aspect of a basic granulite, with hypersthene crystals (Hy) and olivine (OI), next to a groblastic plagioclase mosaic (PI).

Los neises y granofelsa presentan textura granoblástica y granolepidoblástica con orientación de las láminas de biotitas. Las texturas particulares corresponden a simplectitas de biotita-cuarzo y mirmequitas (plagioclasa-cuarzo).

Las asociaciones minerales encontradas son: 1) plagioclasa – cuarzo - feldespato K – biotita ± granate ± hornblenda ± moscovita y 2) plagioclasa – cuarzo - biotita ± sillimanita y granate.

El feldespato alcalino es ortosa; se presenta en cantidades hasta del 16% o puede estar ausente; los cristales son xenoblásticos con contornos lobulados subredondeados sin desarrollo de maclas, pueden tener desmezclas perfiticas en parches; en los contactos con plagioclasa pueden generar bordes de reacción con desarrollo de texturas mirmequíticas; forma mosaicos poligonales localmente con inclusiones de cuarzo a manera de gotas y está levemente empolvado por alteración a caolín.

La biotita se presenta en láminas idioblásticas a xenoblásticas; no sobrepasa el 19% y se encuentra intersticial entre el cuarzo y los feldespatos; tiene extinción en arce moteado, localmente texturas de intercrecimiento simplectítico con gotas y gusanos de cuarzo; puede tener inclusiones de circón con halo pleocroico y opacos; se altera a clorita en los bordes y a lo largo del clivaje.

La moscovita está subordinada a la biotita, generalmente en cantidades menores al 1%, puede ser primaria o de alteración, que se diferencian en tamaño de grano, birrefringencia y hábito; se encuentra en láminas xenoblásticas a subidioblásticas incoloras, ligeramente flexionadas con extinción ondulatoria; puede tener intercrecimientos simplectíticos con cuarzo.

La muestra IGM-900474 tiene relictos de cristales microfracturados de granate y sillimanita empolvada por alteración a sericita. Los cristales pueden estar completamente alterados a sericita, con microinclusiones de opaco, cuarzo y biotita. Como minerales accesorios se encuentran opacos, circón, apatito, hornblenda y allanita.

El contenido de cuarzo en las muestras varía entre 36 y 47%; se presenta en cristales xenoblásticos de tamaño menor a 2,5 mm, con contornos lobulados a irregulares, con extinción ondulatoria y con microfracturas internas irregulares y puede tener inclusiones de circón y opacos a manera de líneas de polvo.

La plagioclasa es de tipo andesina y varía entre An30 y An38, en cristales xenoblásticos a subidioblásticos entre

el 17% y el 49%, con extinción normal; tiene maclas de albita, albita - Carlsbad y Carlsbad; puede estar en agrupaciones granoblásticas junto a cuarzo y feldespato alcalino, y tener microfracturas internas por donde se altera a saussurita imprimiéndole un aspecto que resalta las fracturas al interior de los cristales; localmente forma mosaicos con contactos triples poligonales; tiene inclusiones de circón, biotita y apatito.

### Litogeoquímica

Las muestras de granulitas se comparan con ocho (8) muestras de las Anfibolitas de Medellín, colectadas en la plancha 131 en el municipio de San Pedro, con el fin de constatar si los protolitos de ambas unidades corresponden químicamente al mismo ambiente de basaltos y si ambas unidades son correlacionables pero con diferente grado de metamorfismo. En la Tabla 1 se observan los resultados de óxidos mayores para cada una de las granulitas y anfibolitas. En cuanto al contenido de SiO<sub>2</sub>, muestran que las granulitas corresponden a rocas ultrabásicas y básicas, y en el diagrama TAS (Figura 5) se localizan dentro del campo de los picrobasaltos y basaltos con tendencia subalcalina. Mientras que las Anfibolitas de Medellín caen en el campo de los basaltos con tendencia subalcalina. Las muestras IGM-900471, IGM-900477 e IGM-900260 corresponden a granulitas con olivino y tienen un contenido de SiO<sub>2</sub> menor al 45%, mientras las muestras IGM-900469, IGM-900259 e IGM-900134 corresponden a granulitas básicas sin olivino y con hipersteno cuyos contenidos de SiO<sub>2</sub> se encuentran entre 45% y 52% similar al de las Anfibolitas de Medellín.

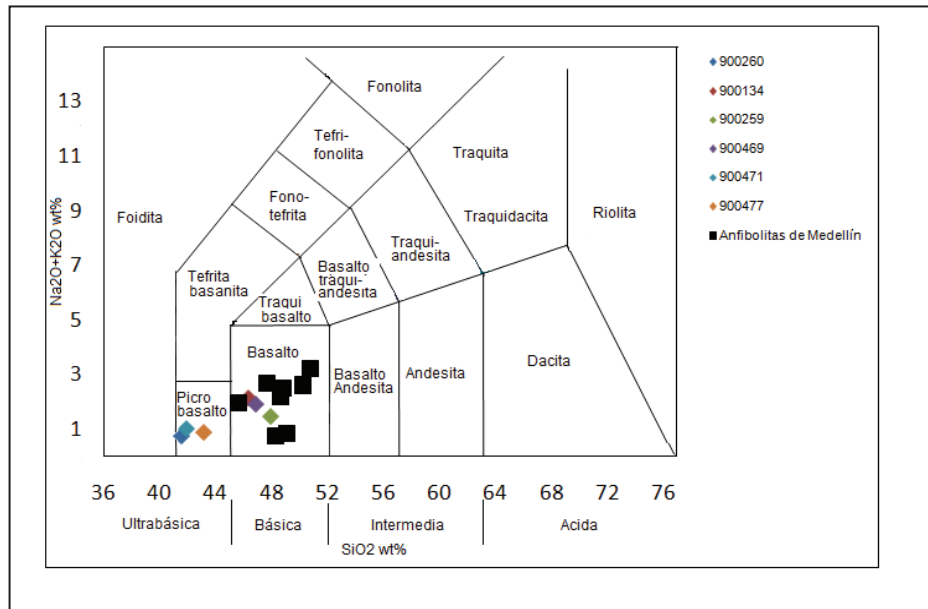
**Tabla 1.** Composición química de los óxidos mayores de las Anfibolitas de Medellín y las Granulitas de San Isidro. Resultados analíticos por espectrografía de masas.

**Table 1.** Major oxides of the Medellín Amphibolites and the San Isidro Granulites. Results of the mass spectrometry analysis.

IGM	ROCA	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)%	MnO%	MgO%	CaO%	Na <sub>2</sub> O%	K <sub>2</sub> O%	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	LOI	Total
707281	ANFIBOLITA	46,0	14,2	11,6	0,2	6,5	15,8	1,8	0,1	1,8	0,2	0,9	99,1
707285	ANFIBOLITA	51,2	20,4	9,0	0,2	5,1	7,7	3,1	0,1	0,8	0,1	3,2	100,9
707287	ANFIBOLITA	48,7	15,7	12,4	0,2	7,3	12,4	0,6	0,1	1,8	0,2	0,8	100,1
707288	ANFIBOLITA	49,0	13,9	14,9	0,2	6,6	11,0	1,9	0,3	2,0	0,2	0,5	100,3
707305	ANFIBOLITA	49,6	15,1	12,9	0,2	7,9	11,7	0,5	0,3	1,8	0,2	0,5	100,7
900037	ANFIBOLITA	48,0	13,8	14,2	0,2	6,7	11,2	2,2	0,4	2,0	0,2	0,9	99,8
900015	ANFIBOLITA	49,3	19,3	11,2	0,1	6,1	8,4	2,1	0,3	1,5	0,2	0,9	99,5
900018	ANFIBOLITA	50,7	16,2	9,7	0,2	7,3	9,3	2,4	0,2	1,3	0,1	0,7	98,1



IGM	ROCA	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)%	MnO%	MgO%	CaO%	Na <sub>2</sub> O%	K <sub>2</sub> O%	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	LOI	Total
900260	GRANULITA	41,7	25,5	10,1	0,1	7,9	13,2	0,7	0,0	0,3	< 0,01	0,6	100,1
900134	GRANULITA	46,6	20,7	11,2	0,2	6,0	10,8	2,1	0,1	1,0	0,3	0,8	99,6
900259	GRANULITA	48,3	16,9	11,2	0,2	10,0	10,3	1,4	0,1	0,7	0,1	0,8	99,9
900469	GRANULITA	47,2	20,0	11,8	0,2	6,7	10,8	1,7	0,2	1,1	0,3	0,9	100,8
900471	GRANULITA	42,1	19,0	12,6	0,2	13,6	12,1	0,6	0,0	0,3	0,0	-0,4	100,2
900477	GRANULITA	43,3	24,8	8,0	0,1	7,6	14,5	0,8	0,0	0,2	0,1	0,3	99,9



**Figura 5.** Diagrama TAS (Cox et al. 1979): concentración de álcalis total vs concentración de SiO<sub>2</sub> para las Granulitas de San Isidro y las Anfibolitas de Medellín.

**Figure. 5.** TAS diagram (Cox et al. 1979): total alkali concentration vs SiO<sub>2</sub> concentration for the San Isidro Granulites and the Medellín Amphibolites.

Las granulitas presentan valores más altos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO y más bajos en TiO<sub>2</sub> (<1,1%) y K<sub>2</sub>O (<0,2%) con respecto a las anfibolitas que tienen contenidos altos de TiO<sub>2</sub> (0,85% a 2,0%) (Tablas 1 y 2). Las granulitas con olivino tienen valores más altos en CaO (10,0 % al 14,05%) y más bajos en alcalis y SiO<sub>2</sub> que las demás muestras. La relación Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> arroja valores para las anfibolitas entre 6,9 y 12,0, con excepción de la muestra IGM-707285 con valor de 24,3. En las granulitas con hipersteno la relación varía entre 18,5 y 24,5, mientras las granulitas con olivino tienen relaciones entre 56,5 y 107,5.

Según los contenidos en MgO, FeO(t) y álcalis, las granulitas y anfibolitas habrían evolucionado siguiendo una tendencia toleítica, con contenidos mayores de MgO de las granulitas con relación a las anfibolitas, que tienen mayores contenidos de FeO(t) (Figura 6).

Durante el metamorfismo, algunos de los elementos mayores probablemente tuvieron un comportamiento móvil (e.g. K, Ba, Sr, Y) y sus contenidos pueden diferir de los originales según las condiciones de presión y temperatura; por tal razón es necesario precisar el grado de variación química que pudiese haber sido introducida por los procesos metamórficos.

En este sentido, el análisis de elementos traza incompatibles de alto potencial iónico, como los pares Nb-Ta y Zr-Hf, cuya variación dentro de las muestras se ilustra en la Figura 7, presenta buenas correlaciones lineales positivas que se observan en las muestras de granulitas y anfibolitas y que indican que no fueron afectadas por el metamorfismo. Las granulitas se agrupan separadamente de las anfibolitas.

**Tabla 2.** Composición química de elementos traza y tierras raras de las Anfibolitas de Medellín y Granulitas de San Isidro.**Table 2.** Trace and rare earth elements of the Medellín Amphibolites and the San Isidro Granulites

IGM	Sc	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Cs	Ba
707281	42	< 1	359	220	46	100	100	90	17	1,9	< 5	2	130	24	108	8,5	< 2	< 0,5	< 0,1	1	0,8	< 0,1	70
707285	26	< 1	170	110	24	40	20	110	21	1,6	< 5	2	281	34	102	3	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	0,1	101
707287	43	< 1	406	180	39	90	60	170	18	2	< 5	1	114	38	112	3,6	< 2	0,5	< 0,1	2	0,3	0,2	40
707288	46	< 1	443	70	50	70	50	130	20	2,4	< 5	4	298	30	117	8,9	< 2	< 0,5	< 0,1	1	< 0,2	< 0,1	55
707305	47	< 1	401	190	49	80	20	120	20	2,5	< 5	8	166	29	107	8,3	< 2	< 0,5	< 0,1	2	0,3	0,2	35
900037	48	2	439	120	50	80	30	130	20	2,2	7	5	221	31	125	10	< 2	< 0,5	< 0,1	7	< 0,2	< 0,1	166
900015	28	1	272	90	30	30	70	160	21	1,4	< 5	10	291	6,3	128	9,6	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	0,4	106
900018	35	1	245	260	35	70	60	120	18	1,8	< 5	2	207	27	161	7,5	2	0,6	< 0,1	< 1	< 0,2	< 0,1	119
900260	4	< 1	199	130	45	30	< 10	70	18	0,9	< 5	< 1	642	1	5	1,3	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	0,1	25
900134	39	< 1	336	40	28	< 20	10	110	21	1,8	< 5	< 1	637	11	16	2	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	0,1	71
900259	56	< 1	226	80	37	< 20	10	110	16	2,2	< 5	1	437	20	30	2,3	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	0,1	62
900469	50	< 1	339	50	31	20	60	110	20	1,7	< 5	4	545	12	15	1,8	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	0,2	0,5	75
900471	27	< 1	201	60	57	50	< 10	90	14	1,5	< 5	< 1	465	2	5	0,4	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	< 0,1	19
900477	12	< 1	159	50	36	20	< 10	70	17	1	< 5	< 1	642	1,3	7	0,3	< 2	< 0,5	< 0,1	< 1	< 0,2	< 0,1	40

IGM	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
707281	7,7	18,8	2,6	12,6	3,7	1,4	4,6	0,8	4,9	0,9	2,6	0,4	2,4	0,4	2,8	0,5	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,3	0,2
707285	6,5	17,1	2,8	14,2	4,7	1,3	5,7	1,1	6,5	1,3	3,6	0,5	3,5	0,5	2,5	0,1	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	< 0,05	0,1
707287	5,6	16,6	2,6	13,5	4,6	1,4	6,0	1,2	7,3	1,4	4,0	0,6	3,9	0,6	3,0	0,2	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,2	0,8
707288	9,9	23,8	3,2	14,7	4,4	1,6	5,3	1,0	5,9	1,1	3,2	0,5	3,1	0,5	3,1	0,5	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,6	0,3
707305	7,9	19,9	2,7	12,9	3,9	1,3	4,8	0,9	5,1	1,0	3,0	0,4	2,9	0,5	2,8	0,4	< 0,5	0,1	7,0	< 0,1	0,9	0,3
900037	8,1	20,6	2,9	13,4	4,1	1,4	5,1	0,9	5,6	1,1	3,2	0,5	3,1	0,5	3,3	0,5	0,7	< 0,05	< 5	< 0,1	0,8	0,3
900015	10,0	20,7	2,4	9,7	2,3	1,4	1,9	0,2	1,2	0,2	0,7	0,1	0,7	0,1	3,0	0,4	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,4	0,2
900018	13,3	31,5	3,9	16,5	4,2	1,6	4,6	0,8	4,7	1,0	2,9	0,4	2,9	0,5	4,2	0,4	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	1,8	0,5
900260	5,4	10,9	1,2	4,2	0,5	0,3	0,3	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	< 0,1	0,0	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,3	0,2
900134	6,8	15,5	2,2	10,2	2,4	1,1	2,4	0,4	2,1	0,4	1,2	0,2	1,1	0,2	0,4	0,1	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,2	0,0
900259	5,4	14,4	2,3	12,2	3,6	1,1	4,0	0,7	3,9	0,8	2,3	0,4	2,2	0,3	0,9	0,1	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,2	0,0
900469	5,6	12,5	1,8	8,8	2,4	1,0	2,7	0,4	2,4	0,5	1,3	0,2	1,2	0,2	0,4	0,1	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,2	0,1
900471	2,0	4,1	0,5	2,0	0,4	0,3	0,5	0,1	0,4	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,1	< 0,01
900477	1,8	3,3	0,4	1,5	0,3	0,3	0,3	0,0	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	< 0,5	< 0,05	< 5	< 0,1	0,1	< 0,01

En la Figura 8 se ilustran los diagramas multielementales de las tierras raras (REE), o de elementos incompatibles, en los que los contenidos de las muestras de Granulitas de San Isidro y Anfibolitas de Medellín se encuentran normalizados con respecto al condrito (McDonough & Sun 1995) o al manto primigenio (Sun & McDonough 1989), respectivamente.

En el diagrama multielemental se observa una diferencia en el patrón de las anfibolitas y de las granulitas; las anfibolitas muestran patrones planos en las tierras raras livianas como en las pesadas, con valores de los elementos incompatibles entre 10 y 35 veces la abundancia en los condritos o en el manto primigenio. Las relaciones interelementales entre las tierras raras ligeras (LREE) y las pesadas (HREE) muestran un enriquecimiento leve de las LREE con respecto a las HREE y un patrón plano intermedio entre los E-MORB y los N-MORB.

Las granulitas presentan dos patrones: el de las granulitas con olivino (picrobasaltos) y el de las granulitas sin olivino (basaltos), este último cercano al patrón de las

anfibolitas pero con mayor pendiente negativa y con contenidos de LREE entre 20 y 30 veces el condrito, con un patrón similar al de arcos. Ambos patrones de las granulitas muestran empobrecimiento de las tierras raras pesadas (HREE): en las granulitas con olivino puede ser menor a uno y estar debajo de los contenidos del condrito, siendo magmas primitivos con valores más bajos en REE que las anfibolitas y granulitas con ortopiroxeno.

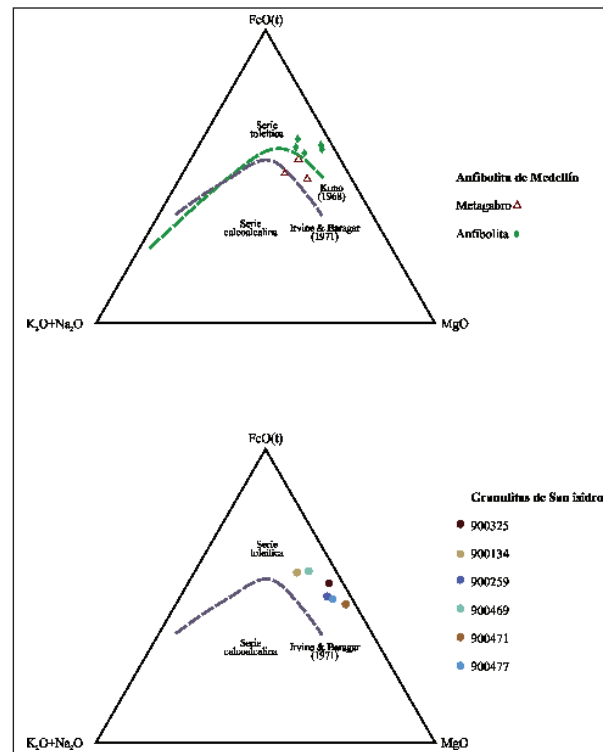
Cinco muestras de granulitas tienen anomalía positiva de Eu, más marcada en las rocas con olivino que en las que tienen solo hipersteno, lo que sugiere un probable protolito a partir de gabros; la anomalía positiva de Eu (diagrama de tierras raras) y Sr (diagrama multielemental), indica que la plagioclasa cristalizó tempranamente y se separó del resto del magma, tal vez por asentamiento de cristales en una cámara magmática o cristalización temprana de fenocristales, (Winter 2001). Las granulitas con olivino presentan enriquecimientos de las LREE del orden de 7 a 25 veces, con mayor empobrecimiento

de la HREE y mayor pendiente negativa; todas las granulitas tienen un patrón con pendiente negativa, con un empobrecimiento de las HREE con relación a las LREE. El patrón de las anfibolitas cae dentro del campo de los MORBs, mientras para las granulitas el patrón con pendiente negativa se asemeja al patrón de arco. La muestra de anfibolita IGM-900015 presenta un patrón comparable al de las granulitas, con anomalía positiva de Eu y la misma tendencia de las LREE y HREE. Se trata de una anfibolita con cummingtonita y granate que es anómala composicionalmente con el resto de anfibolitas. La muestra de granulita IGM-900259 tiene un patrón idéntico al de las anfibolitas, con anomalía negativa de Eu y con un patrón plano de las tierras raras (Figura 8A)

El diagrama de multielementos normalizado con relación al N-MORB (Pearce, 1982), presenta una tendencia comparable entre las granulitas con y sin olivino en la parte de los elementos más móviles (LILE); en los inmóviles hay una clara separación en dos patrones que corresponden a cada uno de los tipos de granulitas, estando las granulitas con olivino más empobrecidas en los elementos incompatibles (HFSE) y, por lo tanto, obedecen a magmas más primitivos y

menos fraccionados que las granulitas con ortopiroxeno. El diagrama presenta picos de valores negativos en Nb, Ta, K, Zr y Hf, y anomalías positivas en Ba, Sr, Eu y Ti que corresponde a una signatura geoquímica que sugiere magmas originados en ambientes tectónicos relacionados a subducción (Wilson, 1989), con anomalía negativa de Nb respecto a Th y Ce que caracteriza las rocas de arco, y agotamiento absoluto con relación a N-MORB de Nb, Zr, Ti e Y que caracteriza los arcos toleíticos. En general, la tendencia es de empobrecimiento desde los elementos compatibles hacia los incompatibles, con una pendiente negativa.

Las características de las fuentes de los magmas se pueden apreciar utilizando las razones K/Ba, Zr/Nb o Zr/Ba que impliquen un elemento traza incompatible y uno altamente incompatible. En las anfibolitas, las razones K/Ba varían entre 10.7 y 25.8 y un valor anómalo de 71 para la muestra 706305; en las granulitas varían entre 6.2 y 14.7 con la mayoría de valores <10; la relación Zr/Nb para las anfibolitas varían entre 12,3 y 34 y Zr/Ba (0,75-3,06) mientras en las granulitas la relación Zr/Nb es (8 a 23,3), excepto la muestra IGM-900260, que dio 3,8 y su relación Zr/Ba (0,18 a 0,48), esta última en general menor al de las anfibolitas.



**Figura 6.** Diagrama AFM según Irvine y Baragar (1971) para las Granulitas de San Isidro, y el diagrama de AFM para las Anfibolitas de Medellín (Modificado de Nivia, 2011).

**Figure 6.** AFM diagram according to Irvine & Baragar (1971) for the San Isidro Granulites and the Medellín Amphibolites.



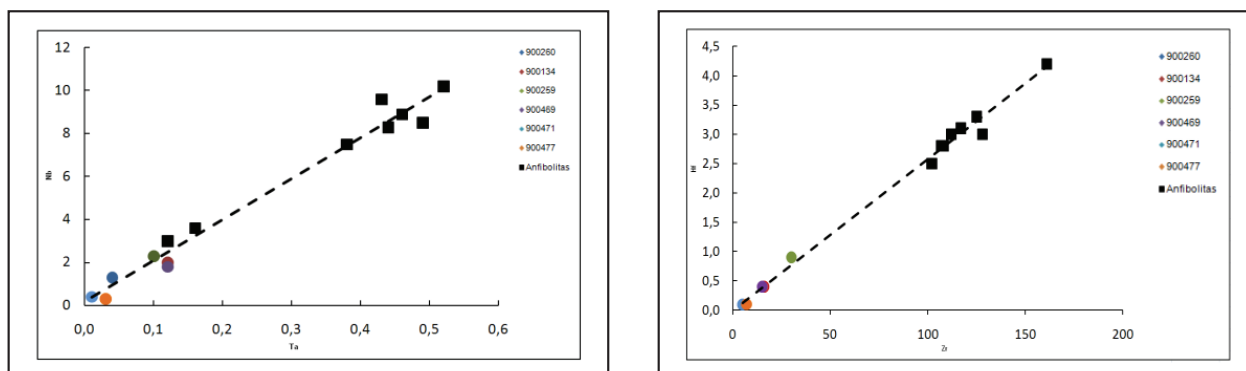


Figura 7. Diagramas de correlación entre Nb-Ta y Zr-Hf para la muestras de las Anfibolitas de Medellín y las Granulitas de San Isidro.

Figure 7. Correlation diagrams between Nb-Ta and Zr-Hf for the Medellín Amphibolites and the San Isidro Granulites

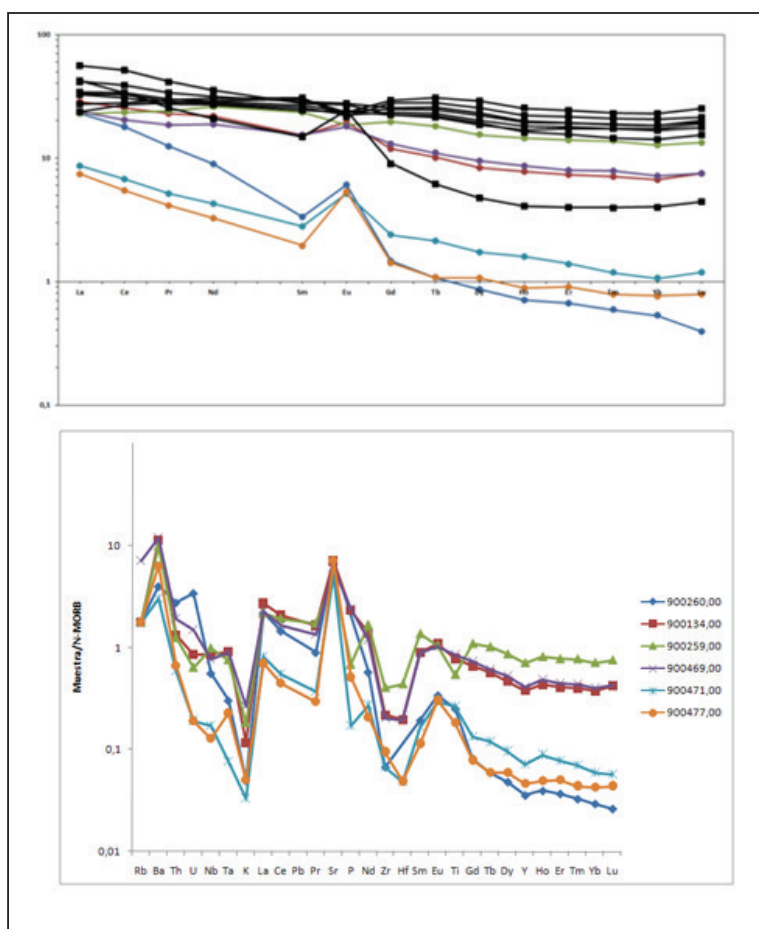


Figura 8. A) Diagrama de REE normalizado respecto al condrito (Nakamura 1974) para las Anfibolitas de Medellín y las Granulitas de San Isidro. B) Diagramas multielementales para las Granulitas de San Isidro.

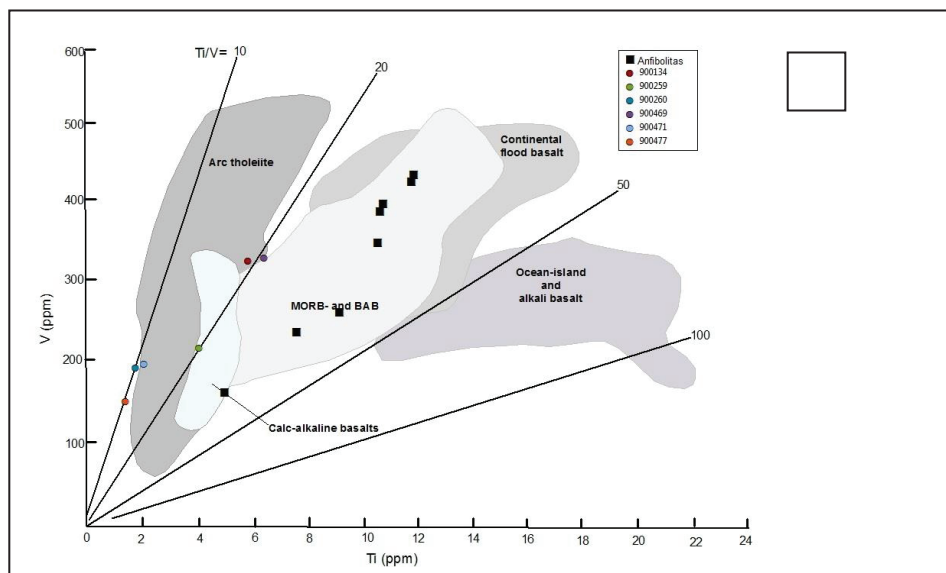
Figure 8. A) Chondrite-normalized REE diagram (Nakamura, 1974) for the Medellín Amphibolites and the San Isidro Granulites. B) Multi-element diagrams for the San Isidro Granulites

La Figura 9 muestra el diagrama TiV de Shervais (1982), que se utiliza para discriminar ambiente tectónico, en el cual Ti y V son inmóviles bajo condiciones de alteración hidrotermal y medio a alto grado de metamorfismo. De acuerdo con la relación Ti/V, las muestras de granulita están en el campo de los basaltos de arco con relaciones de Ti/V entre 10 y 20 y las anfibolitas grafican en el campo de los MORB y basaltos de back-arc, mostrando una clara diferencia entre las granulitas y las Anfibolitas de Medellín.

Restrepo (2008), en rocas correlacionables con la Anfibolita de Medellín (Anfibolitas de Santa Elena), las interpreta como corteza medio oceánica con características de NMORB, aunque una muestra se localiza en el campo EMORB en algunos diagramas.

Para Nivia (2011), las características geoquímicas de las anfibolitas, en particular su rango restringido a basaltos, subalcalinos y toleíticos, y sus patrones planos de elementos incompatibles, guardan similitudes con los plateaus oceánicos y MORB-T, situación que se comparte en este trabajo.

Las Granulitas de San Isidro se clasifican químicamente como basaltos y picro basaltos de afinidad subalcalina y tendencia toleítica; la mayoría de las muestras se localizan en el campo de los basaltos de arco. Corresponden a magmas básicos y ultrabásicos con empobrecimiento en las tierras raras pesadas y los elementos trazas incompatibles.



**Figura 9.** Diagrama TiV de Shervais (1982) para las Granulitas de San Isidro y las Anfibolitas de Medellín.

**Figure 9.** TiV diagram of Shervais (1982) for the San Isidro Granulites and the Medellín Amphibolites.

## FACIES Y METAMORFISMO

Las granulitas básicas presentan mineralogía diagnóstica de la facies granulita de piroxeno, con retrogradaciones del ortopiroxeno y clinopiroxeno a cummingtonita y hornblenda, así como coronas alrededor del olivino con hipersteno-cummingtonita y hornblenda, lo que significa que las rocas alcanzaron las facies granulita y retrogradaron parcialmente de manera local.

La facies granulita se establece con la aparición de hipersteno, puesto que la presencia de diópsido y olivino no es diagnóstica de la facies y no se puede tomar

por sí sola como un indicio de que se alcanzaron las condiciones de la facies granulita.

Los neises y granofelsa cuarzo feldespáticos no muestran una mineralogía diagnóstica de la facies granulita; la mineralogía sólo indica la facies anfibolita alta. La presencia de sillimanita en una muestra del cuerpo de granofelsa cuarzo feldespático indica metamorfismo de baja a media presión, situación que es confirmada por la ausencia de granate en las granulitas básicas y el ensamble de Pl-Cpx-Opx, diagnóstica de granulitas de dos piroxenos formadas a baja presión, por debajo de

5-7 Kbares (Bucher & Frey 1994), junto con la presencia de olivino corriente en granulitas de baja presión.

Los granofelsa presentan una paragénesis de Pl-Qtz-Fk-Bt  $\pm$  Sill y Gt, la cual indican un alto grado de metamorfismo en las facies anfibolita alta – granulita. Estos granofelsa, se encuentran estrechamente relacionados a granulitas básicas (localmente intercaladas), lo cual implica que se formaron en condiciones de metamorfismo de alto grado, en facies granulita. Son rocas sin foliación o poco foliadas, con desarrollo de estructuras migmatíticas homófonas y localmente con anatexia parcial.

Estas rocas provienen de sedimentitas cuarzo–feldespáticas a semipelíticas, y sus características texturales y mineralógicas son típicas de rocas granitoides tipo S con dos micas (biotita y moscovita que pueden estar presentes en bajas cantidades >1%).

La asociación mineral de las rocas básicas indica desarrollo de minerales anhidros como olivino y piroxenos; algunos de estos retrogradaron por la caída de temperatura y entrada de agua al sistema como lo muestran las texturas en corona alrededor del olivino y los piroxenos, pero el contenido de anfíboles en algunas granulitas es menor al 3%, lo que indica que las rocas alcanzaron temperaturas por encima de 850°C, donde desaparecen los minerales hidratados (Bucher & Frey 1994).

La presencia de cummingtonita es más corriente en los tipos bóricos de baja presión (Miyashiro 1973, 1994; Yardley 1989). Sin embargo, este mineral es retrógrado a partir de hipersteno y olivino en las granulitas básicas, el producto final sería antofilita/cummingtonita independiente del tipo bórico, especialmente teniendo en cuenta que son efectos retrógrados durante los cuales no se alcanzan las condiciones de equilibrio. La espinela de tipo hercinita es diagnóstica de granulitas de baja presión (< 4Kbar) (Bucher & Frey 1994).

### POSICIÓN ESTRATIGRÁFICA

Hacia el occidente, las Granulitas de San Isidro se encuentran en contacto con el Batolito Antioqueño. El contacto, en la zona del cerro San Isidro, está cubierto por un extenso depósito de vertiente compuesto en su totalidad por bloques de granulita básica. Hacia el suroccidente, el cuerpo es intruído por el Batolito

Antioqueño; presenta en el borde de contacto, dentro del Batolito, una zona mayor a 1 km de amplitud con múltiples autolitos de andesitas y microdioritas embebidos por tonalitas, y, en el propio contacto, xenolitos de granulitas básicas, lo cual indica un contacto intrusivo; este contacto se observa cerca a la central hidroeléctrica de Río Grande, un kilómetro al oriente de la desembocadura de la Quebrada Mocerongo en el Río Grande.

Al oriente, las granulitas básicas se encuentran en contacto concordante con neises y granofelsa cuarzo feldespático; hay intercalaciones de granulitas básicas y neises. El contacto oriental de las Granulitas de San Isidro, entre granofelsa - granitos con el Batolito Antioqueño, no es claro; localmente es fallado con orientación dinámica de los minerales en el borde del Batolito.

### CONCLUSIONES

“La unidad Granulitas de San Isidro está constituida en el costado occidental por intercalaciones de granulitas básicas con neises biotíticos y granofelsa biotítica, y al oriente del cuerpo por granofelsa cuarzo feldespático y granitos rosados.”

Las granulitas básicas, microscópicamente, presentan textura granoblástica con desarrollo de textura en mosaico, con contactos poligonales en las plagioclasas. Las asociaciones minerales son las siguientes: 1) plagioclasa – hipersteno - hornblenda-cummingtonita, 2) plagioclasa – olivino –hipersteno – clinopiroxeno  $\pm$  espinela - anfíbol retrógrado y 3) plagioclasa – hornblenda - cummingtonita  $\pm$  clinopiroxeno.

El protolito de las Granulitas de San Isidro se clasificó químicamente como basaltos y picro basaltos de afinidad subalcalina y tendencia toleítica. La mayoría de las muestras se localizan en el campo de los basaltos toleíticos formados en un ambiente de arco.

Las Granulitas de San Isidro corresponden a magmas básicos y ultrabásicos, con empobrecimiento en las tierras raras pesadas y los elementos traza incompatibles, con un patrón de REE y elementos trazas que sugieren un ambiente de arco toleítico para el protolito de las metabasitas de esta unidad.



## REFERENCIAS

- Albarracin & Rodríguez, 2012. Capítulo estratigráfico-memoria explicativa del mapa geológico de la plancha 131 – Santa Rosa de Osos. Ingeominas: pp. 42-130.
- Botero, G. (1963): Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Fac. Minas, Univ. Nacional, Medellín*, 57: 1-101.
- Bucher, K. & Frey, M. (2002): *Petrogenesis of metamorphic rocks (segunda edición)*. 318 p. Springer-Verlag, Berlin.
- Cox, K.g., Bell, J.d., & Pankhurst, R.J. (1979): *The interpretation of igneous rocks*. 450 p. Georgan Allen and Unwin, London.
- Fettes, D. & Desmons, J. (eds.) (2007): *Metamorphic rocks. A classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks*. 244 p., University Press, Cambridge.
- Geoestudios-Ingeominas. (2005). *Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa Fé de Antioquia y 146 Medellín Occidental*. 274 p. Ingeominas. Bogotá.
- González, H. (1993): Rocas ortopiroxénicas de afinidad charnoquítica en el Complejo Puquí. . *Memorias del VI Congreso Colombiano de Geología, Medellín*, pp. 434–453.
- Irvine, T.n. & Baragar, W.R.A. (1971): A guide to the geochemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Le Bas, M.i., Le Maitre R.w., Streckeisen, A. & Zanetin, B. (1986): A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.
- Maya, M. & González, H. (1995): Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Bol. Geol., Ingeominas, Bogotá*, 35(23).
- McDonough, W.F. & SUN, S.S. (1995): The composition of the earth. *Chemical Geology*. 120: 228 p.
- Mejía, M. (1984): Geología y geoquímica de la plancha 131 (Santa Fé de Antioquia) y 146 (Medellín occidental). Informe Interno 1950. 376 p. Ingeominas Medellín.
- Nivia, A. (2011): Capítulo: “Geoquímica de Rocas” (Memoria explicativa del mapa geológico de la plancha 131 Santa Rosa de Osos, escala 1:100.000). pp. 171-189. Ingeominas, (inédito), Bogotá.
- Miyashiro, A. (1973): *Metamorphism and metamorphic belts*. 492 p. Allen & Unwin, London.
- Miyashiro, A. (1994): *Metamorphic petrology*. pp. 1-404, UCL Press Ltd., University College London.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 757-775.
- Pearce, J.A. (1982): Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries – In: Thorpe, R.S. (ed.). *Andesites: orogenic andesites and related rocks*. pp. 525-548, John Wiley and Sons, U.K.
- Restrepo, J.J. (2008): Obducción y metamorfismo de ofiolitas Triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra* 22: 49-100, Medellín.
- Restrepo, J.j., & Toussaint, J.F. (1984): Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. *Memorias de la I Conferencia sobre riesgos geológicos del Valle de Aburrá*. Medellín, Sociedad Colombiana de Geología, Medellín, pp. 1-26.
- Restrepo, J.j., Ordoñez-Carmona, O., Armstrong, R. & Pimentel, M.M. (2011): Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. In press. *Journal of South America Earth Sciences*.
- Restrepo, J.j., Toussaint, J.f.; González, H.; Cordani, U.; Kawashita, K.; Linares, E. & Parica, C. (1991): Precisiones geocronológicas sobre el occidente colombiano. *Memorias del Simposio sobre magmatismo Andino y su marco tectónico*. Tomo I, Manizales, pp. 1-22.
- Rodríguez, G., González, H. & Zapata, G. (2005): Geología de la Plancha 147 – Medellín Oriental. 143 p. Ingeominas, Bogotá.
- Rodríguez, G., González, H. & Zapata, G. (2008): Complejo El Retiro, Cordillera Central, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 22: 101-121, Medellín.
- Rodríguez G., González H., Restrepo J. J., Martens U. & Cardona J. D., (2012). Occurrence of granulites in the northern part of the Western Cordillera of

- Colombia. Boletín de Geología. Vol. 34, N° 2: 37-53, Bucaramanga.
- Shervais, J.W. (1982): TiV plots and the petrogenesis of Modern and ophiolitic Lavas. *Earth Planet Science Letters*, 59(1): 101-118.
- Sun, S.S. & McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes - In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.), *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313-345.
- Vernon, R.H. (2004): *A practical guide to rock microstructure*. 595 p. University Press, Cambridge.
- Vinasco, C.j., Cordani, U.g., González, H., Weber, M. & Peláez, C. (2006). Geochronological, isotopic, and geochemical data from PermoTriassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4): 355-371.
- Winter, J.D. (2001): *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. 647 p. Prentice Hall, New Jersey.
- Wood, D.A. (1980): The application of Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and establishing the nature of crystal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet Science Letters*. 50: 11-30.
- Yardley, B.W.D. (1989): *An introduction to metamorphic petrology*. 248 p., Longman Earth Science Series, Wiley & Sons, New York.