

---

---

**METAMORFISMO DE LOS ESQUISTOS VERDES Y ANFIBOLITAS PERTENECIENTES A LOS  
ESQUISTOS DE SANTA MARTA, SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (COLOMBIA):  
¿REGISTRO DE LA COLISIÓN ENTRE EL ARCO CARIBE Y LA MARGEN SURAMERICANA?**

**METAMORPHISM OF THE GREENSCHISTS AND AMPHIBOLITES FROM THE SANTA  
MARTA SCHISTS, SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (COLOMBIA): ARC-CONTINENT  
COLLISION BETWEEN THE CARIBBEAN AND THE SOUTH AMERICAN CONTINENT?**

---

---

*Camilo Bustamante<sup>1</sup>, Agustín Cardona<sup>2</sup>, Mónica Saldarriaga<sup>1</sup>, Antonio García-Casco<sup>3</sup>, Víctor Valencia<sup>4</sup> & Marion Weber<sup>5</sup>*

*1. Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.*

*2. Centro de Investigaciones Tropicales Smithsonian, Balboa, Ancón, Panamá.*

*3. Departamento de Mineralogía y Petrología, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, España*

*4. Departamento de Geociencias, Universidad de Arizona, Tucson, EEUU.*

*5. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Mians, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.*

*camilobl83@yahoo.com, mweber@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 8 de Marzo de 2009 / Aceptación: 15 de Mayo de 2009 / Recibida versión final: 20 de Mayo de 2009

### **RESUMEN**

Los Esquistos de Santa Marta localizados en el segmento NW de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Caribe Colombiano, corresponden a una secuencia metamórfica del Cretácico Superior con protolito volcánico-sedimentario de afinidad oceánica y continental. Las cuatro formaciones en las que se han dividido estos esquistos (Concha, Punta Betín, Cinto y Rodadero) presentan un grado metamórfico que varía entre la facies esquistos verde y la facies anfíbolita alta. Las relaciones de campo y las características petrográficas de los esquistos anfíbólicos indican la existencia de un incremento abrupto en el grado de metamorfismo entre las formaciones Concha y Punta Betín y la Formación Rodadero. Las condiciones de presión y temperatura calculadas por termobarometría convencional y bases termodinámicas internamente consistentes para los dos grupos de rocas anfíbólicas indican presiones entre 3 y 5 kbar y temperaturas entre 300 y 500 °C para Concha y Punta Betín, y entre 7,6 y 9,5 kbar y entre 565 y 665 °C para Rodadero. Esto sugiere que las rocas de más alto grado fueron sobrepuestas sobre las de más bajo grado probablemente durante la exhumación sin-metamórfica. Estas relaciones petrológicas en conjunto con las características composicionales de los anfíboles cálcicos es similar a otras rocas formadas en un tipo bórico de media presión y temperatura, que sugiere que los Esquistos de Santa Marta habrían sido formados en un ambiente colisional, probablemente asociado con la colisión del arco del Caribe y la margen continental Suramericana en el Maastrichtiano-Paleógeno.

**PALABRAS CLAVES:** Caribe, Colisión, Anfíboles, Sierra Nevada de Santa Marta, Geotermobarometría, Barroviano, Colombia.

### **ABSTRACT**

The Santa Marta Schists located in the NW Sierra Nevada de Santa Marta segment, on the Colombian Caribbean correspond to a metamorphic sequence of Upper Cretaceous age and volcano-sedimentary protolith with oceanic and continental affinities. Field relations and petrographic features of the amphibolic schists, suggests a sudden increase in the metamorphic grade between Concha and Punta Betin formations and the Rodadero formation. The pressure and temperature calculations using conventional thermobarometry and internally consistent thermodynamic data base for both groups of amphibolic rocks suggests pressure and temperature ranges between 3 - 5 kbar and 300 - 500° C for Concha and Punta Betin and between 7,6 - 9,5 kbar and 565 - 665 °C for Rodadero. This suggests that the highest grade rocks overthrust the lowest grade rocks during syn-metamorphic exhumation. These petrologic relations together with the compositional features of the calcic amphiboles are similar with other rocks formed in a Barrovian medium pressure and temperature baric type, which indicates that the Santa Marta Schists possibly have been formed in a collisional setting, probably related with the Caribbean Arc and South American continental margin collision during Maastrichtian - Paleogene times.

**KEY WORDS:** Caribbean, Collision, Amphiboles, Sierra Nevada de Santa Marta, Geothermobarometry, Barrovian, Colombia.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución de los Andes del Norte desde el Cretácico Superior ha estado relacionada con la formación y colisión de la Placa Caribe con la margen suramericana. Esta interacción ha generado la acreción de fragmentos ofiolíticos con afinidades geoquímicas de plateau, corteza oceánica normal y arcos de islas que se extienden desde Ecuador hasta Venezuela (Pindell, 1993, Kerr et al., 1997, 2002, Giunta et al., 2002, Sisson et al., 2005, Vallejo et al., 2006, Pindell and Keenan en prensa, Weber et al., en prensa). Este proceso de convergencia se manifiesta igualmente en la formación de una serie de complejos metamórficos, cuyas características petrológicas y temporalidad registran las etapas y características de la subducción y acreción que afectaron los márgenes de las placas del Caribe y Suramérica (Sisson et al., 1997, Smith et al., 1999, Pindell et al., 2005, Garcia-Casco et al., 2006, Weber et al., 2007).

En el segmento noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Caribe colombiano, se encuentra expuesta una secuencia de rocas metamórficas Mesozoicas con protolitos vulcano-sedimentarios (Figura 1) y abundantes rocas metabásicas conocida como Esquistos de Santa Marta (Tschanz et al., 1969, 1974; Doolan, 1970, Cardona et al., aceptado). Dada su posición geológica y características temporales, su historia metamórfica se encuentra estrechamente relacionada con los procesos de convergencia entre la placa del Caribe y la margen Suramericana (MacDonald, 1971).

En el presente trabajo se analizan las características petrológicas y se realizan consideraciones termobarométricas en las metabasitas asociadas a los Esquistos de Santa Marta con el fin de enmarcar el registro metamórfico dentro de los procesos de subducción o acreción del Mesozoico tardío en la margen sur de la placa del Caribe.

## 2. MÉTODOS

Después de una colección de cerca de 80 muestras en campo en el área próxima a la ciudad de Santa Marta, fueron seleccionadas 35 para la realización de secciones delgadas y su análisis petrográfico sistemático.

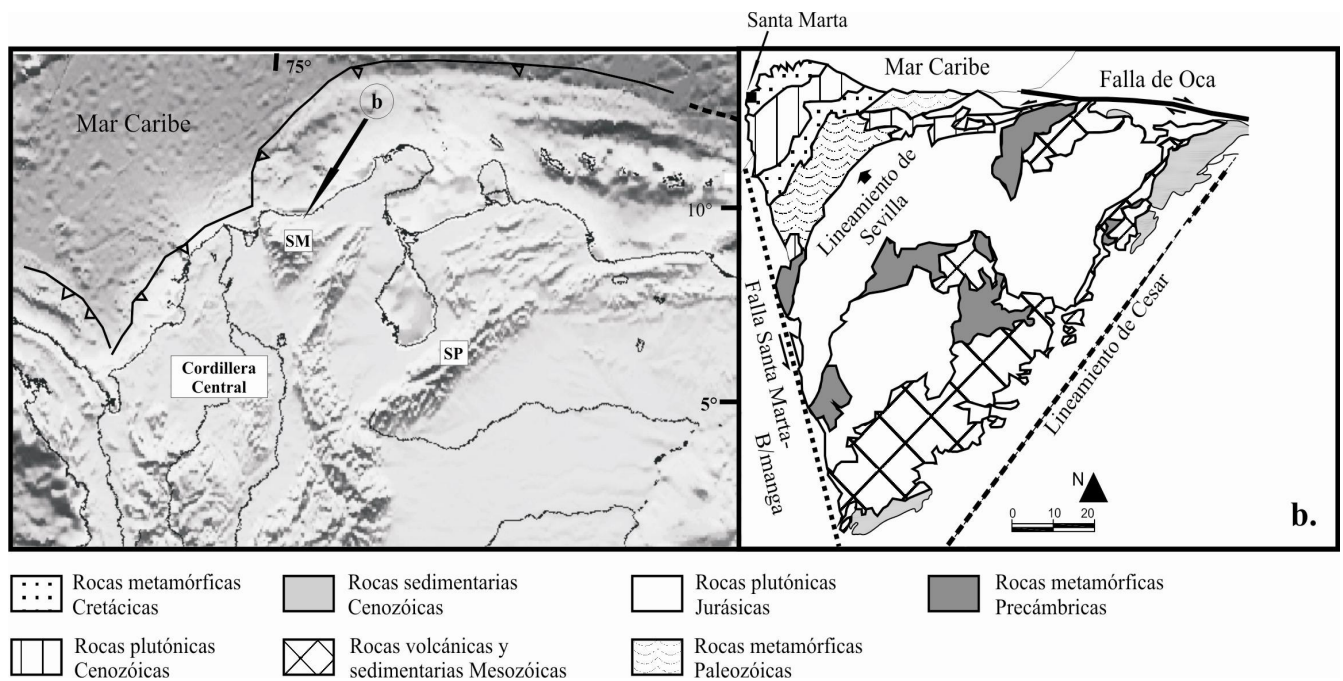
Para la química mineral se escogieron 5 muestras, seleccionadas porque mostraban aparentemente diferentes grados de metamorfismo y una clara relación con los diferentes eventos deformacionales en sección delgada. Estas muestras fueron analizadas por Microsonda Electrónica en los modelos JEOL 8600S y CAMECA SX-50 de las Universidades de Leicester (Inglaterra) y Granada (España), así como en el Departamento de Ciencias Planetarias de la Universidad de Arizona respectivamente, utilizando un voltaje acelerado de 15 kV y una corriente de prueba de 30 nA con un diámetro de rayo de 5 - 10 micrones. Los resultados cuantitativos corregidos fueron estandarizados con una combinación de materiales sintéticos y naturales (bien caracterizados) y corregidos para los efectos de matriz usando el procedimiento de corrección ZAF. Los límites mínimos de corrección se encuentran entre el rango de 0.01 wt% para Na<sub>2</sub>O a 0.04 wt% para FeO.

Los cálculos de fórmula estructural de anfíbol se hicieron con base en 23 oxígenos y los de plagioclasa con 32.

## 3. MARCO GEOLÓGICO

La terminación fisiográfica y geológica de los Andes del Norte hacia el Caribe está caracterizada por la existencia de una serie de macizos cristalinos aislados entre cuencas Cenozoicas. Esta configuración geológica refleja la convergencia transcurrente de la placa del Caribe hacia el oriente y el escape o migración al norte del bloque Andino que caracterizó la tectónica post-Eocena (Macellari, 1995, Pindell et al., 1998, Taboada et al., 2000, Trenkamp et al., 2002, Montes et al., 2005). Reconstrucciones palinspáticas, utilizando como puntos de amarre los elementos litoestratigráficos de basamento y la continuidad facial en algunas cuencas, sugieren la existencia de una conexión y continuidad entre los macizos del Caribe y las Cordilleras Andinas (Duque-Caro, 1979; Villamil, 1999; Gómez et al., 2005, Montes et al., 2005), la Sierra Nevada de Santa Marta es uno de estos macizos aislados.

Geológicamente la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra dividida en tres provincias geológicas constituidas por rocas magmáticas y metamórficas (Figura 1). (i) Provincia Sierra Nevada con un basamento conformado por rocas metamórficas de edad Grenvilliana intruidas por rocas magmáticas Jurásicas. La mayor parte de esta provincia está igualmente cubierta de rocas volcánicas de la misma edad (Tschanz et al., 1974, Restrepo-Pace et al., 1997, Ordoñez-Carmona et al., 2002, Cordani et al., 2005). (ii) Provincia Sevilla su basamento incluye granitoides miloníticos y esquistos anfibólicos y micáceos de edad Paleozoica (Tschanz et al., 1969, 1974, Cardona-Molina et al., 2006). Estas dos provincias tendrían características geológicas comparables con la Cordillera Central de los Andes Colombianos (Tschanz et al., 1974). (iii) Provincia Santa Marta constituida por el cinturón metamórfico de Santa Marta, el cual está conformado por un cinturón interior de esquistos (Esquistos de Gaira, Esquistos de San Lorenzo y Esquistos sin diferenciar), y un cinturón exterior de anfibolitas, esquistos verdes y filitas (Esquistos de Santa Marta), que se plantean como posibles fragmentos alóctonos probablemente acrecionados durante el Meso - Cenozoico (Tschanz et al., 1969, 1974; Doolan, 1970, Cardona-Molina et al., 2006). Estos fragmentos corresponderían a los Esquistos de Santa Marta, objeto de estudio de este trabajo. Un plutonismo de edad Paleógena corta tanto los esquistos Cretácicos como las unidades metamórficas más antiguas del Precámbrico y el Paleozoico (Tschanz et al., 1969, 1974, Cardona et al., 2008a, Mejía et al., 2008).



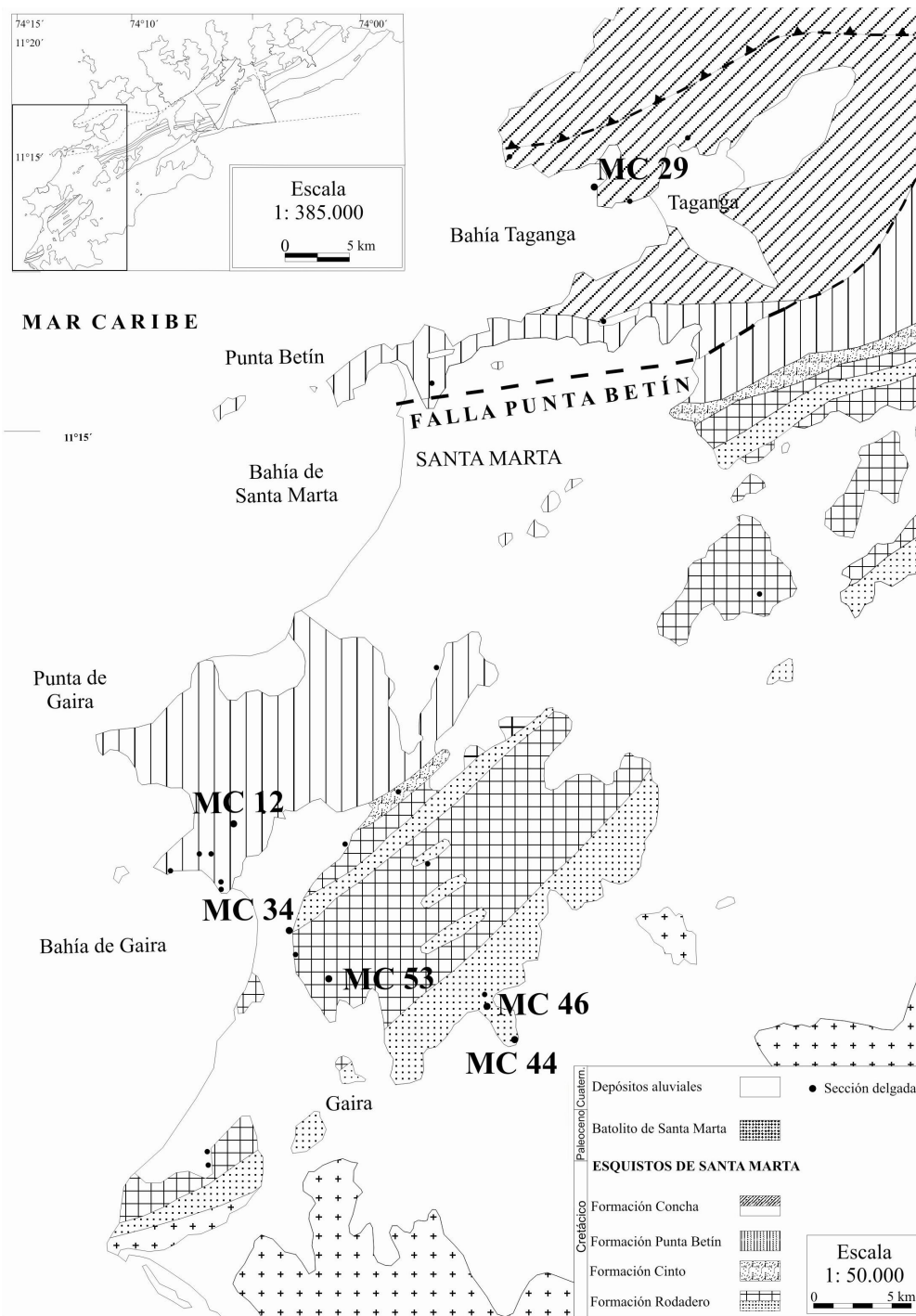
**Figura 1.** A. Mapa del norte de Colombia detallando la geología de la Sierra Nevada de Santa Marta (SM= Santa Marta; SP= Serranía del Perijá). (Figura a: Modificado de Smith y Sandwell, 1997. Figura b: Modificado de Tschanz et al., 1974)

#### 4. GEOLOGÍA DE LOS ESQUISTOS DE SANTAMARTA

Después de algunos trabajos regionales (Gansser, 1955; Radelli, 1962, Tschanz et al., 1969), los Esquistos de Santa Marta localizados en el segmento más noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta fueron caracterizados en detalle por Doolan (1970). En función de las características litoestratigráficas y la variación en el grado metamórfico entre las facies esquistos verde y anfibolita. Doolan (1970) y MacDonald (1971) dividen esta unidad de esquistos en las formaciones Concha, Punta Betín, Cinto y Rodadero (Figura 2).

Las características geoquímicas e isotópicas de las rocas metabásicas sugieren que los protolitos fueron formados en ambientes intraoceánicos, mientras que la presencia de metasedimentos con alto contenido de cuarzo indican una

fuelle continental para los protolitos sedimentarios (Cardona et al., 2008, en prensa). Esto sitúa el ambiente oceánico en proximidad con la margen Suramericana, semejante a lo observado actualmente en las Antillas Menores (White et al., 1985). Restricciones geocronológicas para estas unidades metamórficas, incluyendo las posibles edades de sedimentación y la intrusión del Batolito de Santa Marta, sugieren que la evolución metamórfica de estas rocas podría estar limitada temporalmente entre ca. 60 Ma y 80 Ma (MacDonald et al., 1971, Tschanz et al., 1974, Cardona et al., en prensa).



**Figura 2.** Mapa geológico de los Esquistos de Santa Marta (Modificado de Doolan, 1970). Los puntos negros corresponden a las muestras colectadas para petrografía. Aquellas con nomenclatura son las que se discuten en el texto.

## 5. RELACIONES DE CAMPO Y PETROGRAFÍA

A continuación se describen las características litoestratigráficas más relevantes de cada una de las formaciones que componen los Esquistos de Santa Marta, utilizando como base fundamental la cartografía 1:50.000 realizada por Doolan (1970) así como las nuevas observaciones de campo y petrográficas de este trabajo. La Tabla 1 presenta la síntesis de la composición mineralógica de las rocas analizadas petrográficamente.

En general las diferentes formaciones asociadas a los Esquistos de Santa Marta en la región próxima a Santa Marta-El Rodadero-Taganga y Gaira presentan una foliación metamórfica principal con una orientación promedia de 220° y un buzamiento de 42° al SE. Una crenulación sobreimpuesta sin recrystalización está presente en todas las formaciones y estaría relacionado con la deformación más tardía durante la exhumación o fases deformacionales más jóvenes. Evidencias de fases previas a la deformación principal registradas en inclusiones serán presentadas en los próximos capítulos.

**Tabla 1.** Minerales presentes en los diferentes tipos de rocas de las unidades que componen los esquistos de Santa Marta. Se analizaron 25 secciones delgadas (Concha: 9, Punta Betín: 6, Cinto: 1, Rodadero: 9).

	Roca	Amp	Pl	Cpx	Qtz	Chl	Ep	Czo	Zo	Bt	Ms	Grt	Acc
Concha	MB (E)	45-65	5-10		18-35	5-15	4-12						2-5
	MB (A)	70-75	20-25										<5
Punta Betín	MB	60-70	20-30			5-10	2-8						<5
	MP				60-65					20-25	10-15		
Cinto	MP				10-15					5-10	70-80	2-5	
Rodadero	MB	65-75	15-30	0-15		<5	<5	<5	<5	5-7			<5
	MP		5-15		65-75	10-14				5-15	6-13	3-6	<2

Amp: anfíbol, Pl: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Qtz: cuarzo, Chl: clorita, Ep: epidota, Czo: clinozoisita, Zo: zoisita, Cal: calcita, Bt: biotita, Ms: moscovita, Grt: granate, Acc: accesorios (titanita, apatito, circón y opacos), E: esquistos, A: anfíbolita, MB: metabasita, MP: metapelita. Abreviaturas de los minerales según Kretz (1983).

### 5.1. Formación Concha

Está conformada por esquistos cuarzofeldespáticos, esquistos de feldespato, clorita y calcita de color gris claro y cuerpos de anfibolitas de grano grueso.

La Formación Concha puede ser dividida estructuralmente en dos sectores, uno al norte con buzamiento suave al norte (Doolan, 1970). Otro al suroeste, con un buzamiento fuerte al sur, y se extiende hasta la Formación Punta Betín al sur.

Según Doolan (1970), el contacto con la Formación Punta Betín al sur es fallado y el límite entre ambas unidades es definido por la aparición de anfíbol en la Formación Punta Betín. Sin embargo, las observaciones realizadas en campo sugieren que el contacto coincide con un incremento continuo en el metamorfismo. Composicionalmente, incluye esquistos actinolíticos y cloríticos con esquistosidad definida por actinolita y/o micas (Figura 3a). La mineralogía de estas rocas está representada por: anfíbol (45 - 65%), cuarzo (18 - 35%), plagioclasa (5 - 10%), clorita (5 - 15%), epidota (4 - 12%), y en menor medida (2 - 5%) calcita y titanita.

Las anfibolitas gruesogranulares se componen de anfíbol (70 - 75%), plagioclasa (20 - 25%) y otros minerales que ocurren en menor cantidad (<5%) como calcita, epidota, titanita y cuarzo.

En la muestra MC 29A se presentan adicionalmente blastos de hornblenda (Figura 3b) concordantes con la foliación principal. Localmente se encuentran plegados y con un patrón de fracturas perpendiculares al eje c cristalográfico que podría corresponder a un evento de crenulación posterior observado en campo. Son también comunes los porfidoblastos de plagioclasa alterados a epidota y calcita (Figura 3c).

## 5.2. Formación Punta Betín

Se compone principalmente de esquistos de actinolita, carbonato (o epidota), clorita y plagioclasa. Doolan (1970) indica la existencia de metachert y cuarcitas, así como la presencia de pequeños cuerpos de anfibolitas gruesogranulares, cerca al contacto con la Formación Concha.

Comprende esquistos cloríticos y actinolíticos. Con una mineralogía compuesta por actinolita (60 - 70%), plagioclasa (20 - 30%), epidota (2 - 8%), clorita (5 - 10%) y en menor medida (<5% para cada uno) biotita, moscovita, clinozoisita, calcita, cuarzo, titanita, circón y opacos. La actinolita define la esquistosidad y a la vez está afectada por una crenulación. Al igual que en los esquistos de Concha, se presenta hornblenda junto con actinolita. Este tipo de anfíboles aparecen como porfidoblastos sincinemáticos con inclusiones de cuarzo y plagioclasa y reemplazamientos parciales de clorita (Figura 3d).

La plagioclasa es de tipo albita, con textura de exsolución de sílice. Es común encontrar cristales zonados, con epidota al núcleo y clinozoisita al borde (Figura 3e), y en ocasiones la clinozoisita se encuentra como porfidoblasto (figura 3f).

## 5.3. Formación Cinto

Corresponde a un conjunto de filitas gráficas que gradan a zonas más esquistosas y cuya composición es de cantidades variables de cuarzo y mica, con clorita presente en bandas delgadas, intercrecida con mica blanca, y granates. Está limitado al norte por la Formación Punta Betín, y al sur por las anfibolitas de la Formación Rodadero. Estructuralmente está ubicada entre los esquistos básicos de la Formación Punta Betín, y las anfibolitas y esquistos micáceos de la Formación Rodadero. La componen esquistos moscovíticos con cuarzo, biotita y granate. La mineralogía comprende moscovita (70 - 80%), cuarzo (10 - 15%), biotita, (5 - 10%), granate (2 - 5%) y opacos como accesorios. La roca tiene una textura general granolepidoblástica, definida por la alternación de bandas de micas y cuarzo. Alrededor del granate se forman sombras de presión rellenas de cuarzo. Posee además una foliación interna oblicua a la foliación externa y reemplazamientos parciales por clorita.

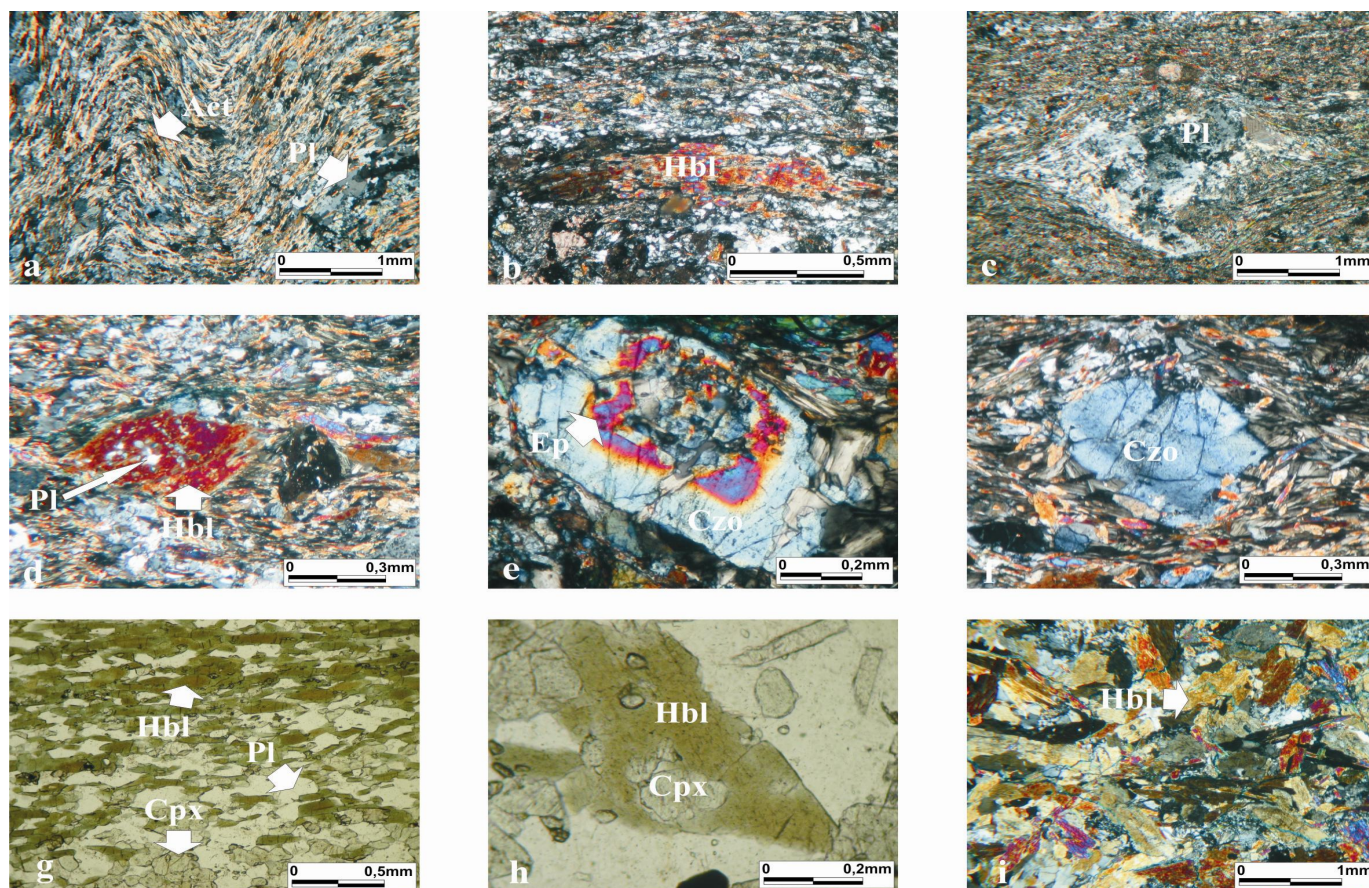
## 5.4. Formación Rodadero

Suprayace la Formación Cinto y es intruida por el Batolito de Santa Marta al sur. Los tipos de roca presentes son predominantemente esquistos de anfíbol, plagioclasa, con aparición de diópsido en algunas zonas, y esquistos de dos micas con granate.

Se compone de anfibolitas, esquistos hornbléndicos con una textura general nematoblástica; y metapelitas que comprenden esquistos micáceos con textura lepidoblástica y cuarcitas. La mineralogía de las metabasitas es anfíbol (65 - 75%), plagioclasa (15 - 30%), clinopiroxeno (0 - 15%), biotita (5 - 7%), y cantidades inferiores a 5% de epidota, clinozoisita, zoisita, clorita, titanita, apatito y sericita.

La hornblenda tiene una textura nematoblástica, está comúnmente zonada con núcleo café a rojo, y borde verde (Figura 3g). El clinopiroxeno forma una textura mosaico poligonal y en ocasiones está como inclusión en anfíbol (figura 3h). Algunas de estas anfibolitas con piroxeno presentan igualmente zoisita. Cerca al contacto con el Batolito de Santa Marta afloran anfibolitas con anfíbol decusado (MC 44F) de diferente naturaleza a los anteriormente descritos (Figura 3i).

La plagioclasa es de tipo andesina, con textura mosaico poligonal, y zonación oscilatoria. Es comúnmente maclada.



**Figura 3.** a. Crenulación de actinolita, formando arcos poligonales en los esquistos actinolíticos de Concha (Muestra MC 29-A), b. Cristal alargado de hornblenda, con fracturamiento perpendicular al eje c cristalográfico, c. Porfidoblasto de plagioclasa epidotizado (Muestra MC 29-A), d. Porfidoblasto sincinemático de hornblenda con inclusiones de plagioclasa. Esquistosidad interna oblicua respecto a la externa). Microfotografía con nicoles cruzados (Muestra MC 12-A), e. Cristal zonado: epidota al núcleo y clinozoisita al borde. f. Cristal de clinozoisita envuelto por la foliación en los esquistos actinolíticos (Muestra MC 12-A), g. Anfíboles zonados de color café al núcleo y verde al centro. También en la microfotografía, clinopiroxeno de relieve más alto, xenoblástico, incoloro y plagioclasa. Microfotografía con nicoles paralelos (Muestra MC 34A), h. Inclusión de clinopiroxeno (incoloro) en anfíbol (verde) (Muestra MC 53-A), i. Anfíboles decusados en anfíbolita de la formación Rodadero cercana al contacto con el Batolito de Santa Marta (Muestra MC 44-F).

Pl: plagioclasa, Cpx: clinopiroxeno, Hbl: hornblenda, Ep: epidota, Czo: clinozoisita; Act: actinolita. Abreviaturas de los minerales según Kretz (1983).

## 6. QUÍMICA MINERAL

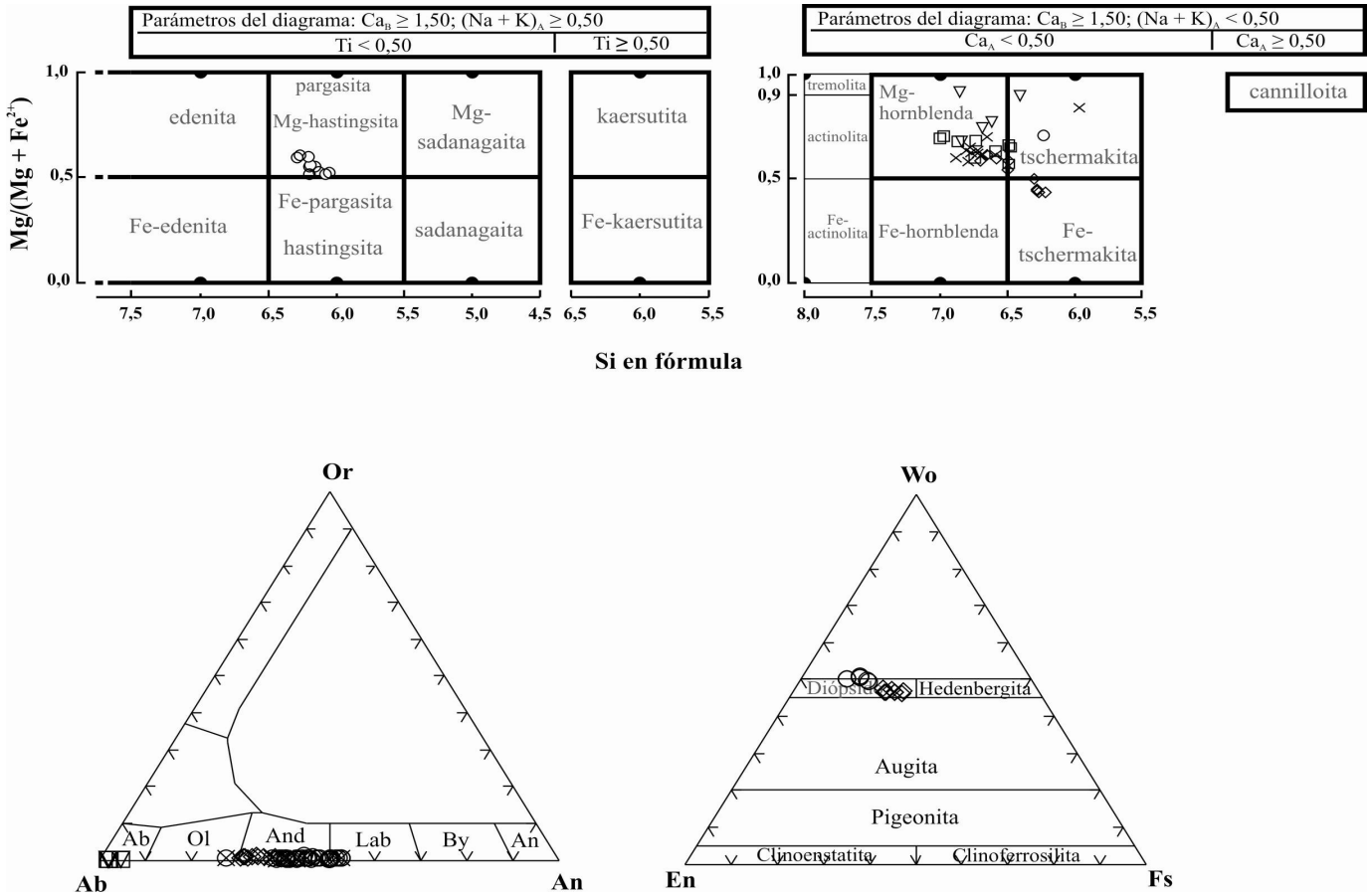
Los análisis de química mineral se realizaron sobre cinco muestras de metabasitas, de las cuales una corresponde a la Formación Concha (MC 29A: esquivo actinolítico), una a la Formación Punta Betín (MC 12A: esquivo actinolítico) y tres de la Formación Rodadero (MC 46A: anfíbolita), (MC 34A y MC 53A: anfíbolitas diposídicas). Los análisis se realizaron sobre anfíbol, plagioclasa y piroxeno (Tabla 2). Se escogieron algunos datos de borde y núcleo para los cálculos termobarométricos y el resto se usaron con propósitos de clasificación mineral.

Los anfíboles analizados en todas las muestras son cálcicos (Figura 4a), de composición magnesiohornblenda y una leve tendencia a tschermakita ( $X_{Mg} > 0,5$  y Si entre 6,5 y 7,0). La anfíbolita diposídica MC 34A de la Formación Rodadero tiene variaciones a ferrotschermakita. La muestra MC 53A a pesar de tener anfíboles cálcicos como las

demás, tiene  $(Na + K)_A \ll 0,5$  y debido a que  $Al^{VI} \gg Fe^{3+}$  y  $Si$  entre 6,0 y 6,5 la composición es pargasita (Figura 4a). Posiblemente las reacciones de desequilibrio presentes en las muestra MC 53A, las cuales no son visibles en la MC 34A, sean responsables de dicha variación composicional en dos rocas de la misma Formación.

La plagioclasa en las Formaciones Concha y Punta Betín es de composición predominantemente albita, mientras en la Formación Rodadero varía entre andesina y labradorita ( $An_{27}$  a  $An_{32}$ ). (Figura 4b).

Fueron analizadas dos muestras con piroxeno de la Formación Rodadero (MC 53A y Mc 34A) las cuales muestran una clara tendencia composicional a piroxenos de tipo Ca-Mg-Fe y se clasifican como diópsido (Figura 4c). Aunque la Figura 4d muestra que no hay variaciones en la composición, hay una cierta tendencia de la muestra MC 53A a ser más enriquecida en calcio (Tabla 2).



**Figura 4.** a. Diagrama de clasificación de anfíboles cálcicos según Leake et al, (1997). Pargasita:  $(Al^{VI} ? Fe^{3+})$ , Magnesiohastingsita:  $(Al^{VI} < Fe^{3+})$ , Ferropargasita:  $(Al^{VI} ? Fe^{3+})$ , Hastingsita:  $(Al^{VI} < Fe^{3+})$ , b. Diagrama de clasificación de plagioclasa, c. Diagrama de clasificación de piroxenos según Marimoto et al, (1988). Símbolos:  $\nabla$  Formación Concha (MC 29A);  $\square$  Formación Punta Betín (MC 12A);  $\diamond$  Formación Rodadero (MC 34A);  $\circ$  Formación Rodadero MC 53A;  $\times$  Formación Rodadero (MC 46A).



TABLA 2. RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL.

Muestra	MC 12A ANFÍBOL										MC 53A ANFÍBOL										MC 29A ANFÍBOL									
	B10	N11	B12	N14	B15	B16	B17	B18	N19	50	51	52	62	67	68	69	74	75	76	77	49	51	52	53	10					
Analisis	46.82	47.65	43.83	45.13	44.76	48.19	45.03	45.42	48.77	41.62	41.62	41.49	42.56	41.65	42.50	42.39	41.66	41.33	40.24	40.72	46.49	45.81	46.46	44.56	48.94					
SiO <sub>2</sub>	0.30	0.35	0.38	0.42	0.33	0.20	0.43	0.21	0.26	1.03	0.95	0.73	0.65	1.07	0.95	0.81	1.32	1.03	1.01	1.18	0.37	0.46	0.40	0.28	0.10					
TiO <sub>2</sub>	10.83	14.25	14.44	14.81	14.39	9.56	13.15	11.95	9.60	15.54	15.54	15.72	14.84	15.04	14.45	14.77	15.03	15.97	15.94	16.08	13.00	12.24	12.33	15.41	10.31					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.02	0.04	0.06	0.02	0.13	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.11	0.05	0.00					
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.51	1.17	1.67	5.62	5.86	3.42	3.68	3.68	2.72	0.21	0.00	0.00	0.00	0.38	5.39	0.37	0.72	0.89	0.73	1.85	0.00	4.53	3.17	7.26	7.11					
FeO	10.28	12.54	12.94	9.74	9.38	9.77	11.28	9.51	10.41	14.31	14.21	13.90	13.18	12.69	8.41	12.72	15.20	14.60	14.76	14.34	10.11	7.05	8.12	2.72	2.69					
MnO	0.32	0.29	0.31	0.36	0.50	0.35	0.27	0.24	0.28	0.33	0.21	0.28	0.29	0.36	0.30	0.33	0.32	0.30	0.36	0.33	0.28	0.34	0.37	0.30	0.32					
MgO	12.17	10.49	9.62	10.13	10.12	12.95	10.77	11.43	13.02	9.96	9.82	9.84	10.87	10.70	11.52	10.94	9.08	9.13	8.81	8.94	11.82	13.30	13.11	13.12	16.02					
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.05	0.04	0.07	0.04	0.03	0.03	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
CaO	11.91	11.41	11.71	11.08	10.57	11.56	11.79	11.91	12.14	12.50	12.71	12.43	12.39	12.37	11.72	12.42	12.12	12.23	12.13	12.15	11.25	11.48	11.60	11.04	11.88					
Na <sub>2</sub> O	1.01	1.65	1.60	1.47	1.91	1.43	1.42	0.62	1.01	2.14	1.97	2.17	2.02	1.97	1.56	2.03	1.99	1.98	2.04	2.03	2.35	1.87	1.87	1.21	0.96					
K <sub>2</sub> O	0.20	0.24	0.34	0.27	0.26	0.24	0.20	0.12	0.20	0.90	0.90	0.91	0.86	0.87	0.77	0.82	0.93	0.92	0.95	0.96	0.07	0.12	0.06	0.05	0.09					
Total	96.35	100.05	96.85	99.08	98.14	97.69	97.53	95.25	98.39	98.57	97.97	97.56	97.90	97.04	97.63	97.63	98.41	98.39	96.98	98.62	95.80	97.30	97.61	96.00	98.40					
<b>Fórmula Estructural</b>																														
Si	6.86	6.74	6.49	6.47	6.48	6.96	6.58	6.73	6.99	6.15	6.18	6.28	6.20	6.22	6.27	6.19	6.13	6.07	6.04	6.80	6.61	6.68	6.40	6.85	6.85					
Al <sup>iv</sup>	1.14	1.26	1.51	1.53	1.52	1.04	1.42	1.27	1.01	1.85	1.82	1.82	1.72	1.80	1.78	1.73	1.81	1.87	1.93	1.96	1.20	1.39	1.32	1.60	1.15					
Al <sup>vi</sup>	0.73	1.11	1.01	0.97	0.94	0.59	0.85	0.82	0.61	0.86	0.90	0.94	0.86	0.84	0.71	0.84	0.82	0.92	0.91	0.86	1.04	0.69	0.77	1.01	0.55					
Ti	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.05	0.02	0.03	0.11	0.11	0.08	0.07	0.12	0.10	0.09	0.15	0.11	0.11	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Cr	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Fe <sup>2+</sup>	0.28	0.12	0.19	0.61	0.64	0.37	0.34	0.41	0.29	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.59	0.04	0.08	0.10	0.08	0.21	0.00	0.49	0.34	0.79	0.75					
Fe <sup>3+</sup>	1.26	1.48	1.60	1.17	1.14	1.18	1.38	1.18	1.25	1.77	1.76	1.73	1.63	1.38	1.03	1.57	1.89	1.81	1.86	1.78	1.24	0.85	0.98	0.33	0.31					
Mn	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.035	0.04	0.04	0.04	0.038					
Mg	2.66	2.21	2.12	2.16	2.18	2.79	2.35	2.53	2.78	2.19	2.17	2.18	2.39	2.37	2.51	2.41	2.01	2.02	1.98	1.98	2.38	2.86	2.81	2.81	3.34					
NiO	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	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Ca	1.87	1.73	1.86	1.70	1.64	1.79	1.85	1.89	1.85	1.98	2.02	1.98	1.99	1.97	1.84	1.97	1.93	1.94	1.96	1.93	1.76	1.77	1.79	1.70	1.78					
Na	0.29	0.45	0.46	0.41	0.54	0.40	0.40	0.18	0.28	0.61	0.57	0.63	0.38	0.37	0.44	0.38	0.37	0.57	0.60	0.38	0.67	0.52	0.52	0.34	0.26					
K	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	0.04	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.14	0.15	0.18	0.17	0.18	0.18	0.013	0.02	0.01	0.01	0.017					
OH	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00					
Total	17.19	17.23	17.38	17.16	17.22	17.24	17.28	17.09	17.18	17.76	17.73	17.76	17.73	17.71	17.43	17.70	17.68	17.74	17.70	17.38	17.32	17.32	17.04	17.06						
<b>Esquema de cálculo</b>																														
(Ca+Na)(B)	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13					
Na(B)	0.13	0.27	0.14	0.30	0.36	0.21	0.15	0.11	0.14	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03	0.16	0.03	0.07	0.06	0.04	0.07	0.24	0.25	0.21	0.30	0.22					
(Na+K)(Δ)	0.19	0.23	0.38	0.16	0.22	0.24	0.28	0.09	0.18	0.76	0.74	0.78	0.73	0.71	0.43	0.70	0.68	0.68	0.74	0.70	0.44	0.32	0.32	0.04	0.06					
Mg/(0.6Fe <sup>2+</sup> )	0.68	0.60	0.57	0.65	0.66	0.70	0.63	0.68	0.69	0.55	0.55	0.56	0.60	0.60	0.71	0.61	0.52	0.53	0.52	0.53	0.68	0.77	0.74	0.90	0.91					
Fe <sup>3+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> +Al <sup>iv</sup> )	0.77	0.10	0.16	0.38	0.41	0.39	0.79	0.33	0.37	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.45	0.05	0.09	0.10	0.08	0.19	0.00	0.47	0.31	0.44	0.88					
Suma de S2	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	12.97	12.98	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	12.93	13.00	13.00	13.00	13.00					

TABLA 2. CONTINUACION.

Muestra	MC 46A ANFIBOL										MC 34A ANFIBOL											
	N48	E49	B55	B56	N57	B58	B59	1	5	6	7	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Analisis	45.75	47.14	45.05	47.14	44.88	45.90	46.31	44.95	45.84	41.06	46.51	45.55	41.10	41.58	41.36	41.45	42.06	44.58	43.83	43.56	45.06	45.52
SiO <sub>2</sub>	1.08	0.88	0.71	0.85	0.97	1.03	0.97	0.76	0.99	0.88	1.01	0.78	0.88	0.76	0.82	0.48	0.67	1.01	0.15	1.60	0.43	0.42
TiO <sub>2</sub>	11.49	12.57	11.38	9.97	12.58	10.50	11.67	10.19	9.55	18.04	10.03	10.20	13.95	13.41	13.82	14.23	13.55	11.09	13.37	11.25	10.78	11.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.66	0.01	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.12	0.05	0.07	0.03	0.08	0.20	0.14	0.02	0.20	0.09	0.00	0.09	0.09	0.12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.36	5.69	3.14	1.53	3.22	1.19	2.71	3.41	3.44	10.73	4.66	3.01	5.83	6.28	5.38	6.20	6.12	5.57	4.97	6.40	6.82	5.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.44	9.08	11.97	13.54	11.79	13.95	11.99	11.68	11.74	3.49	11.07	12.06	15.54	15.17	15.66	14.89	13.86	12.20	13.11	11.93	11.35	12.63
MnO	0.16	0.28	0.31	0.29	0.26	0.23	0.33	0.29	0.27	0.26	0.24	0.21	0.32	0.33	0.32	0.31	0.31	0.35	0.37	0.32	0.31	0.32
MgO	11.11	12.00	10.75	11.30	10.49	10.83	11.07	11.32	11.44	10.30	11.52	11.27	6.75	6.97	6.80	6.66	7.82	10.03	8.75	9.53	10.15	9.97
ZnO	0.00	0.60	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.05	0.09	0.08	0.03	0.08	0.05	0.06	0.00
CaO	12.01	11.66	11.95	12.23	11.76	12.09	11.96	11.94	11.71	10.48	11.63	11.80	11.00	10.97	11.01	10.65	11.02	11.20	11.02	10.66	11.10	11.22
Na <sub>2</sub> O	1.10	1.65	0.84	0.92	0.97	1.06	0.90	1.00	0.99	0.96	0.96	1.07	1.68	1.53	1.57	1.50	1.46	1.40	1.35	1.69	1.18	1.21
K <sub>2</sub> O	0.52	0.48	0.53	0.50	0.62	0.60	0.54	0.56	0.56	0.54	0.50	0.55	0.89	0.94	0.98	1.13	1.05	0.69	1.17	0.52	0.77	0.83
F	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.23	0.20	0.27	0.23	0.30	0.25	0.22	0.27	0.22
Total	98.13	100.34	96.68	98.32	97.63	97.42	98.50	96.14	96.65	96.76	98.21	96.54	98.35	98.43	98.19	97.93	98.46	98.56	98.42	97.85	98.38	98.56
<b>Fórmula Estructural</b>																						
Si	6.68	6.64	6.68	6.88	6.58	6.78	6.71	6.72	6.80	5.96	6.77	6.77	6.21	6.27	6.25	6.27	6.29	6.57	6.49	6.48	6.64	6.69
Al <sup>iv</sup>	1.32	1.36	1.32	1.12	1.42	1.22	1.29	1.28	1.20	2.04	1.23	1.23	1.79	1.73	1.75	1.73	1.71	1.43	1.51	1.52	1.36	1.31
Al <sup>vi</sup>	0.65	0.73	0.67	0.59	0.76	0.61	0.71	0.51	0.47	1.04	0.49	0.55	0.69	0.65	0.71	0.80	0.68	0.50	0.82	0.45	0.51	0.60
Ti	0.12	0.69	0.08	0.09	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.10	0.11	0.09	0.10	0.09	0.09	0.05	0.08	0.11	0.02	0.18	0.05	0.05
Cr	0.01	0.61	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.26	0.54	0.35	0.17	0.35	0.13	0.30	0.38	0.38	1.17	0.51	0.34	0.66	0.71	0.61	0.71	0.69	0.62	0.55	0.72	0.76	0.56
Fe <sup>2+</sup>	1.52	1.07	1.48	1.65	1.45	1.72	1.45	1.46	1.46	1.46	0.42	1.35	1.50	1.96	1.91	1.98	1.88	1.73	1.50	1.62	1.48	1.55
Mn	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	1.52	1.57	1.53	1.50	1.74	2.21	1.93	2.11	2.23	2.19
Mg	2.42	2.52	2.38	2.46	2.29	2.39	2.39	2.52	2.53	2.23	2.50	2.50	1.78	1.77	1.78	1.73	1.77	1.77	1.75	1.70	1.75	1.77
Ca	1.88	1.76	1.90	1.91	1.85	1.91	1.86	1.91	1.86	1.63	1.81	1.88	0.49	0.45	0.46	0.44	0.42	0.40	0.39	0.49	0.34	0.34
Na	0.31	0.29	0.24	0.26	0.28	0.30	0.25	0.29	0.28	0.27	0.27	0.31	0.17	0.18	0.19	0.22	0.20	0.13	0.22	0.10	0.14	0.16
K	0.10	0.69	0.10	0.09	0.12	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.10	0.12	0.11	0.10	0.13	0.11	0.14	0.12	0.10	0.13	0.10
OH	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.88	1.89	1.90	1.87	1.88	1.86	1.88	1.89	1.87	1.90
Total	17.28	17.13	17.24	17.26	17.24	17.33	17.21	17.31	17.25	17.00	17.18	17.29	17.44	17.40	17.43	17.38	17.39	17.30	17.36	17.29	17.23	17.27
Esquema de Cálculo	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13	Σ13
(Ca+Na)(B)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.90	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na(B)	0.12	0.24	0.10	0.09	0.15	0.09	0.14	0.09	0.14	0.27	0.19	0.12	0.22	0.23	0.22	0.27	0.23	0.23	0.25	0.30	0.25	0.23
(Na+K)(A)	0.28	0.13	0.24	0.26	0.24	0.33	0.21	0.31	0.25	0.10	0.18	0.29	0.44	0.40	0.43	0.38	0.39	0.30	0.36	0.28	0.23	0.27
Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	0.61	0.70	0.62	0.60	0.61	0.58	0.62	0.63	0.63	0.84	0.65	0.62	0.44	0.45	0.44	0.44	0.44	0.50	0.59	0.54	0.59	0.61
Fe <sup>3+</sup> /(Fe <sup>3+</sup> +Al <sup>vi</sup> )	0.28	0.42	0.34	0.22	0.32	0.18	0.29	0.43	0.45	0.53	0.51	0.38	0.49	0.52	0.46	0.47	0.50	0.55	0.40	0.61	0.60	0.48
Suma de S2	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00

TABLA 2. CONTINUACION

Muestra	MC 33A PLAGIOCLASA																											
	11	12	13	15	16	17	18	19	20	82	84	85	86	89	100	101	102	104	106	115	118	119	120	122	141	142		
Analisis	59.49	53.56	56.05	57.34	57.05	58.77	56.18	56.86	57.69	56.84	56.93	57.70	55.53	54.86	59.69	57.78	54.91	53.67	53.84	54.90	54.69	54.68	52.59	54.84	58.11	58.17		
SiO <sub>2</sub>	25.62	28.84	27.65	27.34	28.80	29.60	32.06	28.12	27.43	31.12	34.01	30.17	32.07	28.74	32.55	28.66	28.01	28.71	29.28	28.31	28.80	29.25	29.66	28.66	29.44	30.25		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.09	0.10	0.05	0.04	0.11	0.12	0.07	0.07	0.10	0.35	0.14	0.12	0.69	0.20	0.11	0.04	0.08	0.05	0.27	0.01	0.11	0.07	0.08	0.36	0.13		
FeO	5.82	9.39	9.34	8.48	8.36	8.36	7.47	9.12	8.29	9.96	8.42	9.80	11.16	9.09	8.47	9.89	10.15	10.16	11.27	10.27	10.44	10.59	10.28	10.49	8.90	9.24		
CaO	8.55	6.57	6.24	6.80	7.32	6.98	6.91	6.72	6.71	5.97	6.58	5.69	5.52	5.63	7.29	6.37	5.19	5.57	5.59	5.70	5.84	5.79	5.61	5.71	7.15	6.75		
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.12	0.10	0.10	0.07	0.10	0.12	0.05	0.11	0.12	0.04	0.10	0.09	0.13	0.11	0.16	0.10	0.12	0.10	0.05	0.07	0.06	0.05	0.09	0.05	0.10		
K <sub>2</sub> O	99.78	98.56	99.47	100.11	101.63	103.92	102.86	104.95	100.30	104.11	106.33	103.01	104.50	99.15	108.30	102.36	98.40	98.31	100.13	99.50	99.85	100.47	98.27	99.89	104.03	104.65		
TOTAL	10.74	11.01	10.85	10.75	10.61	10.35	10.45	10.69	10.72	10.37	10.13	10.43	10.38	10.90	9.95	10.50	10.97	11.02	10.86	10.88	10.79	11.04	10.85	10.39	10.31	10.31		
T2	10.63	9.57	10.02	10.25	10.20	10.51	10.04	10.16	10.31	10.16	10.18	10.31	9.93	9.81	10.67	10.33	9.82	9.59	9.62	9.81	9.78	9.77	9.40	9.80	10.39	10.40		
Si	5.40	6.07	5.83	5.76	6.07	6.24	6.75	5.92	5.78	6.55	7.16	6.36	6.76	6.05	6.86	6.04	5.90	6.05	6.17	5.96	6.07	6.16	6.25	6.04	6.20	6.37		
Al	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.02	0.10	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01	0.05	0.02		
Fe(tot)	1.12	1.80	1.79	1.62	1.60	1.60	1.43	1.75	1.59	1.91	1.61	1.88	2.14	1.74	1.62	1.89	1.94	1.95	2.16	1.97	2.00	2.03	1.97	2.01	1.70	1.77		
Ca	2.96	2.28	2.16	2.36	2.54	2.42	2.39	2.33	2.33	2.07	2.28	1.76	1.91	1.95	2.52	2.21	1.80	1.93	1.94	1.98	2.02	2.01	1.94	1.98	2.48	2.34		
Na	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02		
K	20.16	19.76	19.83	20.02	20.42	20.80	20.67	20.19	20.04	20.73	21.29	20.36	20.77	19.69	21.73	20.52	19.49	19.56	19.92	19.77	19.88	20.00	19.58	19.86	20.84	20.92		
TOTAL	27.21	43.83	45.03	40.58	38.54	39.63	37.16	42.72	40.30	47.64	41.31	51.21	52.48	46.78	38.88	45.78	51.62	49.86	52.39	49.74	49.52	50.10	50.16	50.13	40.64	42.83		
An	72.29	55.53	54.42	58.87	61.09	59.83	52.15	56.98	59.05	51.67	58.47	48.15	47.00	52.43	60.53	53.33	47.80	49.45	47.04	49.96	50.07	49.57	49.56	49.34	59.07	56.61		
Ab	0.50	0.64	0.55	0.55	0.37	0.54	0.68	0.30	0.64	0.69	0.23	0.64	0.52	0.80	0.59	0.89	0.38	0.69	0.57	0.31	0.41	0.33	0.28	0.53	0.29	0.56		
Or	MC 46A PLAGIOCLASA																											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	15	16	17	18	19	20	82	84	85	86	11	13	17			
Analisis	38.31	59.55	39.46	39.44	39.62	38.61	39.75	38.29	39.86	39.49	33.56	36.05	37.34	37.05	38.77	36.18	36.86	37.69	36.84	36.93	37.70	35.53	38.78	38.45	65.29			
SiO <sub>2</sub>	26.11	24.75	25.56	25.42	24.90	25.71	24.88	25.17	25.02	25.62	28.84	27.65	27.34	28.80	29.60	32.06	28.12	27.43	31.12	34.01	30.17	32.07	20.20	19.99	21.25			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.25	0.10	0.10	0.20	0.33	0.47	0.38	0.25	0.21	0.09	0.10	0.05	0.04	0.11	0.12	0.07	0.07	0.10	0.35	0.14	0.12	0.20	0.11	0.06			
FeO	7.81	6.70	7.02	7.01	6.42	7.32	6.47	6.66	6.48	5.82	9.39	9.34	8.48	8.36	8.36	7.47	9.12	8.29	9.96	8.42	9.80	11.16	0.88	0.46	0.95			
CaO	6.97	7.76	7.41	7.48	8.03	7.27	7.75	7.44	7.84	8.55	6.57	6.24	6.80	7.32	6.98	6.91	6.72	6.71	5.97	6.58	5.09	5.52	12.00	11.89	11.10			
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.13	0.18	0.20	0.11	0.17	0.16	0.18	0.17	0.09	0.12	0.10	0.10	0.07	0.10	0.12	0.05	0.11	0.12	0.04	0.10	0.09	0.07	0.06	0.07			
K <sub>2</sub> O	99.45	99.14	99.73	99.65	99.28	99.41	99.48	99.12	99.62	99.78	98.56	99.47	100.11	101.63	103.92	102.86	100.95	100.30	104.11	106.33	103.01	104.50	101.63	100.96	98.72			
TOTAL	10.80	10.81	10.74	10.75	10.79	10.80	10.78	10.81	10.75	10.74	11.01	10.85	10.75	10.61	10.35	10.45	10.69	10.72	10.37	10.13	10.43	10.38	10.36	10.43	10.68			
T2	MC 12A																											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	15	16	17	18	19	20	82	84	85	86	11	13	17			
Analisis	10.42	10.64	10.63	10.62	10.66	10.48	10.68	10.60	10.70	10.63	9.57	10.02	10.25	10.20	10.51	10.04	10.16	10.31	10.16	10.18	10.31	9.93	12.29	12.23	11.67			
SiO <sub>2</sub>	5.50	5.21	5.38	5.35	5.25	5.42	5.24	5.30	5.27	5.40	6.07	5.83	5.76	6.07	6.24	6.75	5.92	5.78	6.55	7.16	6.36	6.76	4.25	4.21	4.48			
Al	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.05	0.07	0.06	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01			
Fe(tot)	1.50	1.28	1.34	1.34	1.23	1.40	1.24	1.28	1.24	1.12	1.80	1.79	1.62	1.60	1.43	1.75	1.59	1.91	1.61	1.88	2.14	1.88	2.14	0.07	0.09	0.18		
Ca	2.42	2.69	2.57	2.59	2.78	2.52	2.69	2.58	2.72	2.96	2.28	2.16	2.36	2.54	2.42	2.39	2.33	2.07	2.28	1.76	1.91	1.91	4.16	4.12	3.85			
Na	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02			
K	19.89	19.90	19.98	19.97	19.97	19.90	19.95	19.83	20.00	20.16	19.76	19.83	20.02	20.42	20.80	20.67	20.19	20.04	20.73	21.29	20.36	20.77	20.83	20.68	20.20			
TOTAL	37.84	32.06	34.01	33.73	30.45	35.40	31.28	32.75	31.05	27.21	43.83	45.03	40.58	38.54	39.63	37.16	42.72	40.30	47.64	41.31	51.21	52.48	1.71	2.07	4.47			
An	61.12	67.20	64.96	65.13	68.93	63.62	67.80	66.20	67.98	72.29	55.53	54.42	58.87	61.09	59.83	62.15	56.98	59.05	51.67	58.47	48.15	47.00	97.89	97.59	95.11			
Ab	1.04	0.74	1.04	1.15	0.62	0.98	0.92	1.05	0.97	0.50	0.64	0.55	0.55	0.37	0.54	0.68	0.30	0.64	0.69	0.23	0.64	0.52	0.39	0.34	0.42			
Or																												

TABLA 2. CONTINUACION

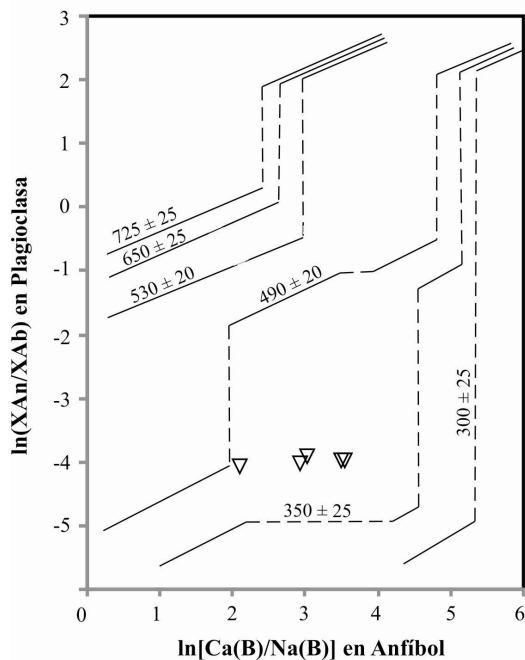
Muestra	MC 34A PIROXENO								MC 53A PIROXENO						
	1	2	3	4	5	6	7	8	53	54	55	60	61	73	79
<b>Análisis</b>															
<b>SiO<sub>2</sub></b>	52.27	52.31	52.95	52.69	52.36	53.24	52.99	53.30	53.36	52.42	52.45	54.09	54.02	52.35	51.34
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.03	0.10	0.02	0.02	0.53	0.07	0.00	0.05	0.07	0.20	0.17	0.00	0.04	0.08	0.15
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.91	0.91	0.33	0.43	0.54	1.40	0.45	0.60	1.24	1.72	2.11	0.53	0.61	2.14	3.51
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.00	0.06	0.09	0.02	0.03	0.09	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.00	0.00	2.95	0.00	0.00	3.45	2.76	6.01	1.16	0.00	0.91	6.04	3.45	0.00	0.00
<b>FeO</b>	14.05	13.97	9.20	13.14	12.34	9.53	9.52	5.96	6.56	7.56	6.69	0.77	3.08	8.80	8.61
<b>MnO</b>	0.40	0.37	0.44	0.41	0.35	0.39	0.47	0.41	0.34	0.36	0.31	0.37	0.33	0.33	0.38
<b>MgO</b>	9.82	10.15	11.53	10.66	10.64	10.35	11.41	11.51	13.08	12.84	12.88	14.56	14.31	12.42	12.04
<b>CaO</b>	21.99	21.60	22.41	22.11	22.24	21.42	22.28	22.94	25.07	24.81	24.79	25.59	25.34	24.26	23.35
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.33	0.32	0.19	0.17	0.24	0.58	0.19	0.19	0.33	0.34	0.54	0.20	0.20	0.45	0.48
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
<b>TOTAL</b>	99.80	99.79	100.12	99.65	99.27	100.52	100.11	101.05	101.20	100.26	100.88	102.17	101.38	100.82	99.87
	<b>Fórmula Estructural</b>														
<b>Si</b>	2.01	2.00	2.01	2.02	2.01	2.02	2.01	2.01	1.97	1.95	1.93	1.97	1.98	1.94	1.92
<b>Al</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.07	0.02	0.02	0.06	0.08
<b>Al</b>	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.03	0.07
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	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	0.00
<b>Cr</b>	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	0.00
<b>Ti</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0.40	0.37	0.33	0.37	0.35	0.35	0.33	0.32	0.23	0.24	0.23	0.19	0.19	0.27	0.25
<b>Mn</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<b>Mg</b>	0.56	0.58	0.65	0.61	0.61	0.59	0.65	0.65	0.72	0.71	0.71	0.79	0.78	0.69	0.67
<b>Ca</b>	0.90	0.89	0.91	0.91	0.92	0.87	0.91	0.93	0.99	0.99	0.98	1.00	1.00	0.96	0.94
<b>Na</b>	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	0.04
<b>K</b>	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	0.00
<b>TOTAL</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>Wo</b>	46.85	46.04	46.63	46.53	47.37	46.58	46.51	47.64	50.67	50.78	50.78	50.19	50.34	49.85	49.55
<b>En</b>	29.11	30.10	33.38	31.21	31.53	31.32	33.14	33.26	36.79	36.55	36.71	39.73	39.56	35.51	35.54
<b>Fs</b>	24.04	23.86	19.99	22.26	21.10	22.11	20.35	19.10	12.54	12.67	12.52	10.08	10.10	14.64	14.91

## 7. TERMOBAROMETRÍA

La caracterización termobarométrica fue realizada en la foliación principal, la crenulación sobrepuesta carente de recristalización sugiere que ésta ocurrió en condiciones menores a las de la deformación principal. Las paragénesis y el grado de desarrollo de la esquistosidad presente en las Formaciones Concha y Puta Betín son características de la facies esquistos verde, claramente indicando temperaturas superiores a 300° C (Bucher y Frey, 1994).

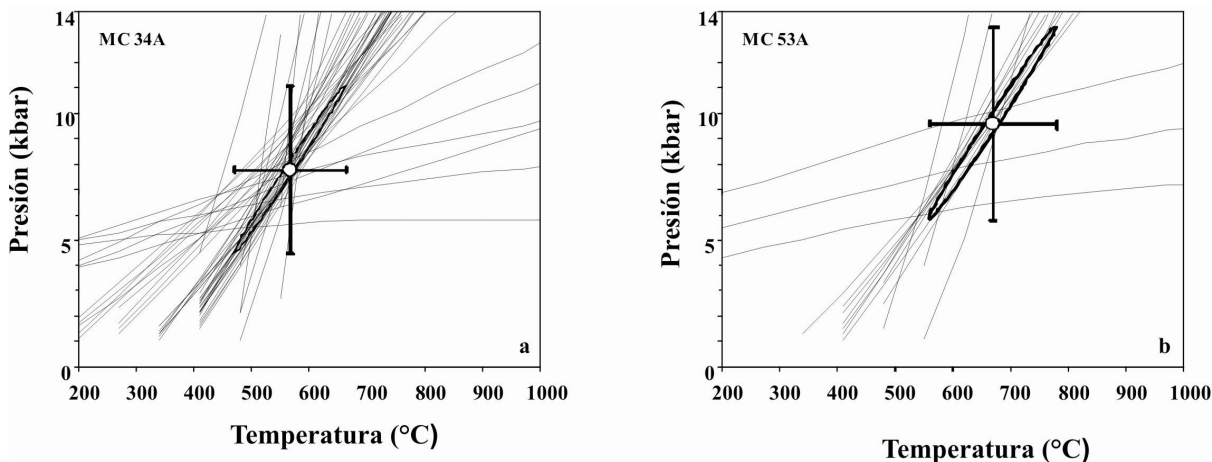
La presencia de anfíbol tipo hornblenda en los esquistos actinolíticos de la Formación Concha indica que el metamorfismo es prógrado hacia el sureste, alcanzando probablemente la transición entre la facies esquistos verde y la anfíbolita. En la Formación Punta Betín la existencia de una zonación con núcleos de epidota y bordes de clinzoisita sugieren que la reacción que elimina epidota de la facies esquistos verde para generar clinzoisita estaría incompleta (Bucher y Frey, 1994) y por lo tanto rocas de esta formación podrían igualmente estar asociadas a esta zona de transición. En el termómetro anfíbol-plagioclasa de Spear (1980) la formación Concha presenta temperaturas  $350 \pm 25^\circ$  y  $490 \pm 20^\circ$  C (Figura 5). Estos dos tipos de valores obedecen a la variación en el contenido de Al, y reflejaría la transición entre las dos facies previamente mencionadas. Dado que la formación Punta Betín tiene características petrográficas similares, se consideran rangos probablemente semejantes. La zona de transición podría ser continua hasta las metapelitas con granate de la formación Cinto, localizadas inmediatamente al sureste donde la primera aparición de granate sugiere temperaturas de ca. 450° (Miyashiro, 1994, Bucher y Frey, 1994). Indicadores de presión para estas formaciones son limitados. Sin embargo la presencia de clinopiroxeno en las anfíbolitas de la Formación Rodadero es indicador de condiciones de la facies anfíbolita alta (Bucher y Frey, 1994). La aparición de clinopiroxeno en la facies anfíbolita

tiene lugar alrededor de los 650°C (Bucher y Frey, 1994), y normalmente la reacción que lo genera consume la epidota o clinozoisita para formar zoisita, esta última fue encontrada como un importante componente. De otro lado la presencia de texturas poligonales entre anfíbol, plagioclasa y clinopiroxeno en algunas de las anfibolitas indica igualmente condiciones de deformación a alta temperatura (Passchier y Trouw, 1996).



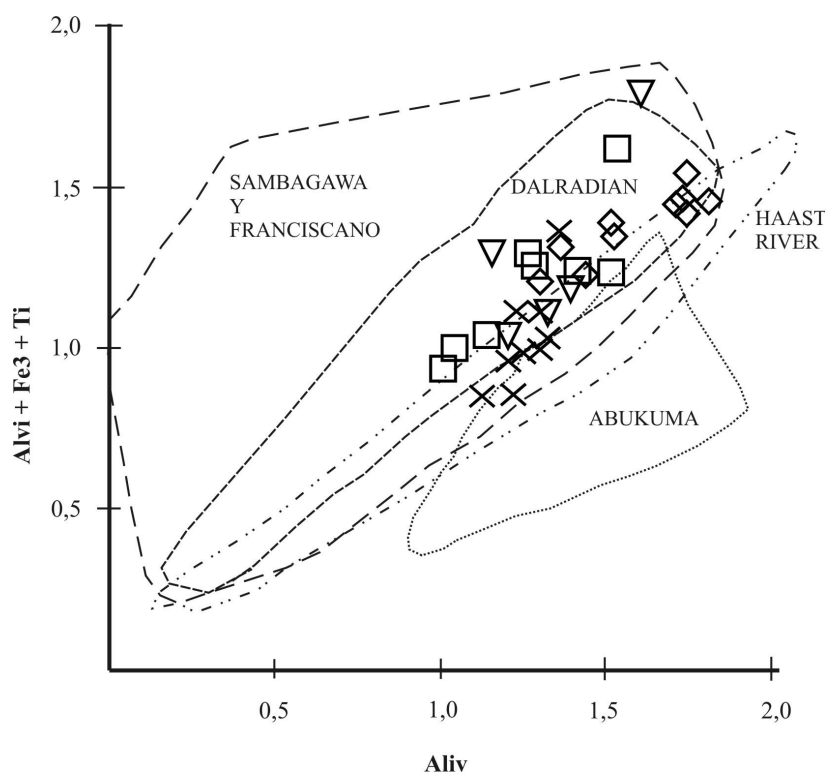
**Figura 5.** Gráfico de la calibración del termómetro de Spear (1980), usado para los análisis de la Formación Concha.

Para las muestras MC 34A y MC 53A de la Formación Rodadero, fue posible utilizar las composiciones de los bordes de anfíbol, plagioclasa y piroxeno y calcular la presión y la temperatura con el software Thermocalc, que considera las reacciones posibles a partir de una base termodinámica internamente consistente. En el caso de las muestras analizadas el número de reacciones independientes es dos, de manera que fue calculado un punto pseudoinvariante cuyo significado es semejante a aplicar un termómetro y un barómetro para obtener un punto en la intersección de las reacciones. Los resultados obtenidos indican presiones y temperaturas medias de 7.6 y 9.5 kbar y 565 y 665° C (Figuras 6a y b). Esta diferencia puede explicarse por la presencia de plagioclasa más sódica en la MC 53A, lo que aumenta los valores de P y T.



**Figura 6.** a. Estimación de P y T para la muestra MC 34A (anfíbolita) de la Formación Rodadero usando bordes de anfíbol, piroxeno y plagioclasa, b. Estimación de P y T para la muestra MC 53A (anfíbolita) de la Formación Rodadero usando bordes de anfíbol, piroxeno y plagioclasa.

La composición de los anfíboles cálcicos es altamente susceptible a cambios del régimen de presión y temperatura (Laird y Albee, 1981). Estos mismos autores compilan las composiciones de anfíboles cálcicos asociados a diferentes terrenos metamórficos, cuyo origen estuvo asociado a diferentes relaciones de presión y temperatura. Los anfíboles de las diferentes formaciones de esquistos de Santa Marta se ubican dentro de los anfíboles del cinturón metamórfico tipo Dalradian (Figura 7, Laird y Albee, 1981). Este cinturón fue formado en un tipo bórico de media P/T (Laird y Albee, 1981, Miyashiro, 1994). La persistencia de una plagioclasa de carácter sódico coexistiendo con el anfíbol tipo hornblenda en los esquistos de la Formación Concha y Punta Betín, es también afín con características metamórficas de media presión (Spear, 1993).



**Figura 7.** Diagrama que muestra la relación de Aliv con Alvi+Fe<sub>3</sub>+Ti en los anfíboles cálcicos y sódico-cálcicos, con diferentes series de facies representativas en el mundo. Los campos encerrados corresponden a: el terreno Sambagawa de alta presión (Japón), el terreno Franciscano de alta presión (California), el terreno Dalradian de media presión (SW Escocia), el grupo de esquistos de Haast River de media presión (Nueva Zelanda) y el terreno de baja presión Abukuma (Japón) (Modificado de Laird y Albee, 1981). Símbolos: ▽ Formación Concha (MC 29A); □ Formación Punta Betín (MC 12A);

◇ Formación Rodadero (MC 34A); × Formación Rodadero (MC 46A).

## 8. DISCUSIÓN E IMPLICACIONES TECTÓNICAS

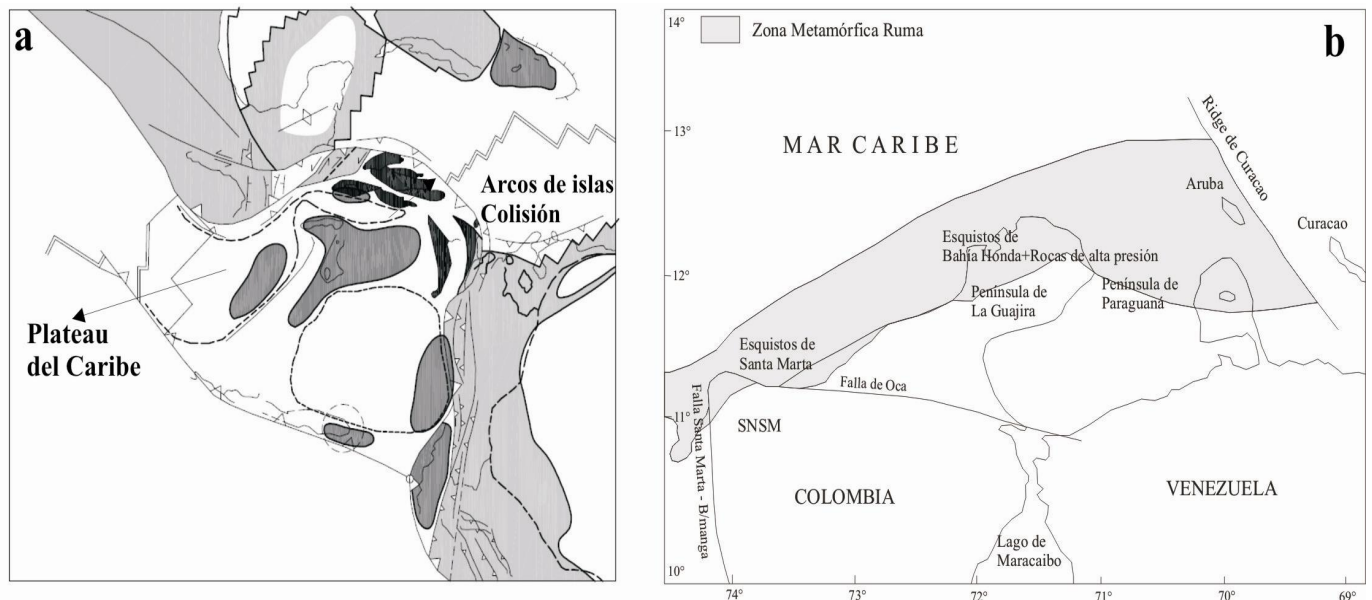
La formación de cinturones metamórficos de media presión del tipo Barroviano ha sido relacionada con ambientes tectónicos del tipo colisional, o como el reflejo de la erosión por subducción de la placa superior continental durante la subducción (Miyashiro, 1994, Best, 2003, Stöckhert y Gerya, 2005).

Normalmente durante los eventos colisionales, los procesos de apilamiento tectónico dan lugar a la yuxtaposición de rocas de alto grado con rocas de bajo grado (Agard et al., 2009, Guillot et al., 2009). Los resultados presentados para los esquistos de Santa Marta indican que la foliación metamórfica principal cristalizó en condiciones metamórficas de media presión. De igual forma, se hace evidente que entre las Formaciones Rodadero y las otras tres Formaciones

(Concha, Punta Betín y Cinto) existe un contraste en el grado metamórfico. Así rocas metamorfizadas a temperaturas de ca.  $650^{\circ}$  se encuentran en contacto con rocas cristalizadas entre  $350^{\circ}$  y  $500^{\circ}$ . Si bien los indicadores de presión para las formaciones Concha y Punta Betín son más escasos, recientemente Cardona et al. (2008b), establecieron condiciones de metamorfismo en esquistos con granate de la formación Cinto de ca.  $529^{\circ}$  C y 5.5 Kb. Esta formación cuya extensión no supera 1 km, separa la Formación Rodadero de la Formación Punta Betín. Estas presiones contrastan claramente con los valores de 7.6 y 9.5 Kb obtenidos en este trabajo en el Rodadero. De manera que el incremento abrupto tanto en la presión como la temperatura implica un elemento tectónico para su yuxtaposición.

Los protolitos de los Esquistos de Santa Marta incluyen rocas con afinidad de MORB, arco oceánico y sedimentos de ambiente continental formados en el Maastrichiano (Cardona et al., aceptado), mientras que intrusivos no deformados en el norte de Colombia incluyendo el Batolito de Santa Marta, sugieren que los eventos metamórficos habrían ocurrido con anterioridad o próximos 65 Ma (Cardona et al., 2008a). Por esta razón se sugiere que el metamorfismo registrado en Santa Marta reflejaría la colisión de un arco intra-oceánico probablemente asociado al frente de convergencia de la placa del Caribe y la margen continental de Suramérica entre el Maastrichiano y el Paleoceno Inferior (Figura 8a). Si bien la paragénesis de anfibolitas con piroxeno está relacionada con un evento metamórfico regional y no directamente con la intrusión como había sido sospechado inicialmente por Doolan (1970), los efectos del Batolito de Santa Marta sobre la Formación Rodadero incluirían algunas texturas decusadas encontradas en anfibolitas cerca del contacto entre ambas unidades.

MacDonald et al. (1971) sugirieron la existencia de un cinturón metamórfico Cretácico asociado a la evolución tectónica del Caribe, el que denominaron Ruma (Figura 8b). Este se extiende desde la Sierra Nevada de Santa Marta hasta las Antillas Holandesas y la Península de Paraguaná en Venezuela.



**Figura 8.** a. Colisión entre el arco del Caribe y la margen continental Suramericana durante el Maastrichiano-Paleoceno (Pindell et al., 2005). b. Cinturón metamórfico Ruma (MacDonald et al., 1971).

Dentro de este cinturón, en la región de la Guajira, recientemente Weber et al. (2007, 2009) presentan evidencias regionales de colisión arco continente para el Cretácico tardío en el norte de Colombia, para las rocas metamórficas de alta presión con trayectorias Alpinas localizadas en la Península de la Guajira. La evolución de zonas colisionales incluye una fase de subducción continental donde se formarían en el canal de subducción los complejos de alta presión por subducción continental, seguida por el proceso colisional de apilamiento de nappes donde tendría lugar el metamorfismo barroviiano de media presión (Agard et al., 2009, Guillot et al., 2009). En este sentido, se podría suponer

que los complejos metamórficos del Norte de Colombia (Santa Marta y Guajira) presentan vestigios de estas diferentes fases, estando en cinturón de Santa Marta marcando el proceso colisional final. La segmentación tectónica experimentada por la margen como consecuencia del desplazamiento relativo de la placa Caribe hacia el oriente durante el Oligo-Mioceno habría modificado las relaciones de un orógeno previamente coherente (Pindell et al., 2005).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de ECOPETROL-ICP, INVEMAR e INGEOMINAS dentro del proyecto Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. El trabajo en la microsonda fue posible gracias a la invaluable colaboración de R. Wilson y K. Domanik de las Universidades de Leicester y Arizona respectivamente. Los autores agradecen también las oportunas sugerencias de los revisores de este artículo, así como al cuidado editorial de la señora Mónica Rada, coordinadora editorial de la revista.

Igualmente estamos agradecidos por las discusiones y el apoyo recibido por parte de G. Guzmán, F. Colmenares, G. Ojeda, A. Bustamante. y G. Toro. Este trabajo es una contribución al proyecto IGCP 546 "Zonas de subducción del Caribe".

## REFERENCIAS

- Agard, P., Yamato, P., Jolivet, I. and Burov, E., 2009. Exhumation of oceanic blueschists and eclogites in subduction zones: timing and mechanism. *Earth Science Reviews* 92, pp. 53-79
- Best, M., 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell Publishing. 718 P.
- Bucher, K. and Frey, M., 1994. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 6° ed. Springer - Verlag, Berlin. 318 P.
- Cardona-Molina, A., Cordani, U.G and MacDonald, W.D., 2006. Tectonic correlations of pre - Mesozoic crust from the northern termination of the Colombian Andes, Caribbean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 21, pp. 337 - 354.
- Cardona, A., Duque, J., Ruiz, J., Valencia, V., Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, G and Orozco, M. T., 2008a. Geochronology and tectonic implications of granitoid rocks from the northwestern Sierra Nevada de Santa Marta and surrounding basins, northeastern Colombia: Late Cretaceous to Paleogene convergence, accretion and subduction interactions between the Caribbean and South American plates. 18va Conferencia Geológica del Caribe. República Dominicana.
- Cardona, A., Garcia-Casco, A., Ruiz, J., Valencia, V., Bustamante, C., Garzón, A., Saldarriaga, M. and Weber, M., 2008b. Late Cretaceous Caribbean-South America interactions: insights from the metamorphic record of the NW Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. 18va Conferencia Geológica del Caribe. República Dominicana.
- Cardona, A., Valencia, V., Bustamante, C., Garcia-Casco, A., Ojeda, G., Ruiz, J., Saldarriaga, M. and Weber, M., En prensa. Tectonomagmatic setting and provenance of the Santa Marta Schists, Northern Colombia: insights on the growth and approach of Cretaceous Caribbean Oceanic Terranes to the South American continent. *Journal of South American Earth Sciences*. Special Issue: Sierra Nevada de Santa Marta.
- Cordani, U.G., Cardona, A., Jiménez, D.M., Liu, D. and Nutran, A.P., 2005. Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. En: Vaughan, A.P.M., Leat, P.T., Pankhurst, R.J. (eds), 2005. *Terrane Processes at the Margins of Gondwana*. Geological Society of London, Special Publications, 246, pp. 329 - 346.
- Doolan, B.L., 1970. The structure and metamorphism of the Santa Marta area Colombia, South America. Ph.D. Dissertation, N.Y. State Univ., Binghamton, N.Y. 200 P.
- Duque-Caro, H., 1979, Major structural elements and evolution of northwestern Colombia, in J. S. Watkins, L. Montadert, and P. W. Dickerson, eds., *Geological and geophysical investigations of continental margins: AAPG Memoir* 29, pp. 329-351



- Gansser, A., 1955. Contribución a la geología y petrografía de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia, Suramérica). Traducido de Gansser, A., 1955. Ein Beitrag zur Geologie und Petrographie der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien, Sudamerika): Schweizer. Mineralog. u. Petrog. Mitt., 35 (2), pp. 209 - 279.
- García-Casco, A., Torres-Roldán, R.L., Iturralde-Vinent, M., Millán, G., Nuñez, K., Lázaro, C. and Rodríguez, A., 2006. High pressure metamorphism of ophiolites in Cuba. *Geologica Acta*. 4, pp. 63-88.
- Giunta, G., Beccaluva, L., Coltorti, M., Siena, F. and Vaccaro, C., 2002. The southern margin of the Caribbean Plate in Venezuela: tectono-magmatic setting of the ophiolite units and kinematic evolution. *Lithos*. 63, pp. 19-40.
- Gómez, E., Jordan, T., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., and Kelley, S., 2005. syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes: *Geological Society of America Bulletin*, 117, pp. 547-569.
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, Ph., Schwartz, S. and Vidal, O., 2009. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: a review. In: Lallemand, S., Funiciello, F. (Eds) *Subduction zone geodynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 175-205.
- Kerr, A.C., Marriner, F., Tarney, J., Nivia, A, Saunders, A.D, Thirlwall, M.F., Sinton, W., 1997. Cretaceous basaltic terranes in western Colombia: Elemental, Chronological and Sr-Nd isotopic constraints on Petrogenesis. *Journal of Petrology*. 38, pp. 677-702.
- 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 the Geological Society*. 159, pp. 577-594.
- Kretz, R., 1983. Symbols of Rock Forming Minerals. *American Mineralogist*, 8, pp. 277 - 279.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., and Youzhi, G., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names. *Canadian Mineralogist*, 35, pp. 219 - 246.
- Laird, J. and Albee, A.L., 1981. Pressure, temperature and time indicators in mafic schists: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. *American Journal of Science*, 28, pp. 127 - 175.
- Macdonald, W., Doolan, B. and Cordani, U., 1971. Cretaceous-Early Tertiary metamorphic age values from the South Caribbean. *Geological Society of America Bulletin*. 82. pp. 1381-1388.
- Macellari, C.E., 1995. Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia. In Tankard, A. J., Suárez Soruco, R., Welsink, J., *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geologist. AAPG Memoir 62, pp. 757-780.
- Mejía, P., Santa, M., Ordóñez, O. y Pimentel, M., 2008. Consideraciones petrográficas, geoquímicas y geocronológicas de la parte occidental del Batolito de Santa Marta. *Revista Dyna*, (155), pp. 223 - 236.
- Miyashiro, A., 1994. *Metamorphic Petrology*. Oxford University Press, New York. 404 P.
- Montes, C., Hatcher, R.D. and Restrepo-Pace, P., 2005. Tectonic reconstruction of the northern Andean blocks: Oblique convergence and rotations derived from the kinematics of the Piedras-Girardot area, Colombia. *Tectonophysics*, 399, pp. 221-250.
- Ordóñez-Carmona, O., Pimentel, M.M. and De Moraes, R., 2002. Granulitas de Los Mangos: un fragmento grenviliano en la parte SE de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 26, pp. 169-179.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996. *Microtectonics*. Springer - Verlag, Berlin. 289 P.
- Pindell, J.L., 1993, Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean, in S.K. Donovan and T.A. Jackson (eds.),

- University of the West Indies Publisher's Association. *Caribbean Geology: An Introduction*, pp. 13-39.
- Pindell, J.L., Higgs, R. and Dewey, J.F., 1998. Cenozoic palinspastic reconstruction, paleogeographic evolution, and hydrocarbon setting of the northern margin of South America. In: Pindell, J. L. & Drake, C. L. (eds) *Paleogeographic Evolution and Non-glacial Eustasy, northern South America*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication, 58, pp. 45-86.
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W., Stanek, K., Draper, G. and Higgs, R., 2005. Plate kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins. In: Ave-Lallemant and Sisson (eds) *Geological Society of America Special Paper 394*, pp. 7-52.
- Pindell, J., Kennan, L., in press. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update, in James, K., Lorente, M. A., and Pindell, J. eds., *The geology and evolution of the region between North and South America: Geological Society of London Special Publication*.
- Radelli, L., 1962. Acerca de la geología de la Serranía de Perijá entre Codazzi y Villanueva. *Geología Colombiana*, (1), pp. 23 - 41.
- Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G. and Cosca, M., 1997. Geochronology and Nd isotopic data of Grenville - age rocks of the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic - Early Paleozoic paleocontinental reconstruction of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, pp. 427 - 441.
- Sisson, V.B., Avé Lallemant, H.G., Ostos, M., Blythe, A.E., Snee, L.W., Copeland, P., Wright, J.E., Donelick, R.A., and Guth, L.R., 2005. Overview of radiometric ages in three allochthonous belts of northern Venezuela: Old ones, new ones, and their impact on regional geology. In Avé Lallemant, and Sisson, V.B. (eds) *Caribbean / South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394*, pp. 91-118.
- Sisson, V.B., Ertan, I.F., Avé-Lallemant, H.G., 1997. High Pressure (~2000 MPa) glaucophane-bearing pelitic schist and eclogite from Cordillera de la Costa belt, Venezuela. *Journal of Petrology* 38, pp. 65-83.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, 277. pp. 1956-1962.
- Smith, C.A, Sisson, V.B., Avé-Lallemant, H.G., 1999. Two contrasting pressure temperature-time paths in the Villa de Cura blueschist belt, Venezuela: Possible evidence for Late Cretaceous initiation of subduction in the Caribbean. *Geological Society of America Bulletin: Vol. 111, No. 6*, pp. 831-848.
- Spear, F.S., 1980. NaSi CaAl exchange equilibria between plagioclase and amphibole. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 72, pp. 33 - 41.
- Spear, F.S., 1993. *Metamorphic phase equilibria and Pressure - Temperature - Time paths*. Mineralogical Society of America Monograph. Washington D.C. 799 P.
- Stöckhert, B. and Gerya, T. V., 2005. Pre-Collisional high pressure metamorphism and nappe tectonics at active continental margins: a numerical simulation. *Terra Nova*, 17, pp. 102-110.
- Taboada, A. et al., 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subduction and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*. 19, pp. 787-813.
- Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T. and Mora, H. P., 2002. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. 15, pp. 157-171.
- Tschanz, C.M., Jimeno, A. and Vesga, C., 1969. *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area (Colombia)*. Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica, Minero - Ambiental y Nuclear. República de Colombia. 288 P.
- Tschanz, C.M., Marvin, R.F., Cruz, J., Mehnert, H.H. and Cebula, G.T., 1974. Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia. *Geological Society of America*, 85, pp. 273 - 284.
- Vallejo, C., Spikings, R.A., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D. and Page, L., 2006. The early interaction between the

- Caribbean Plateau and the NW South American Plate. *Terra Nova* 18, pp. 264-269.
- Villamil, T., 1999. Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and Western Venezuela. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 153, pp. 239-275.
- Weber, M., Cardona, A., Wilson, R., Gómez-Tapias, J. y Zapata, G., 2007. Química Mineral de las rocas de alta presión-Facies Eclogita, de la Península de la Guajira, Colombia. *Boletín de Geología* 29, pp. 31-38.
- Weber, M., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepúlveda, L. and Wilson, R. in press. The Cabo de la Vela mafic-ultramafic complex, Northeastern Colombian Caribbean region - a record of multi stage evolution of a Late Cretaceous intra-Oceanic arc. In: James, K., Lorente, M. A., and Pindell, J. eds., *The geology and evolution of the region between North and South America: Geological Society of London Special Publication*.
- Weber, M., Cardona, A., Valencia, V. A., Garcia-Casco, A., Altenberger, U., Zapata, S. and Tobón, M., 2009. Late Cretaceous tectonic interactions between the South American plate and the Caribbean arc: insights from the magmatic and metamorphic record of the Guajira region, northern Colombia. VII Congreso Cubano de Geología. Workshop IGCP-546.
- White, W.M., Dupré B. and Vidal., P., 1985. Isotope and trace element geochemistry of sediments from the Barbados Ridge-Demerara Plain region, Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 49, pp. 1875-1886.

