

CONSIDERACIONES PETROGRÁFICAS, GEOQUÍMICAS Y GEOCRONOLÓGICAS DE LA PARTE OCCIDENTAL DEL BATOLITO DE SANTA MARTA

PETROGRAPHIC, GEOCHEMICAL AND GEOCHRONOLOGICAL CONSIDERATIONS OF THE WESTERN PORTION OF SANTA MARTA BATHOLITH

PABLO MEJÍA HERRERA

Ingeniero Geólogo Minera el Roble, mejia.pablo@gmail.com

MONICA SANTA ESCOBAR

Ingeniera Geóloga, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, masantaes@gmail.com

OSWALDO ORDÓÑEZ CARMONA

Geólogo, Profesor, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. oswaldo.geologo@gmail.com

MARCIO PIMENTEL

Geólogo, Profesor Universidad de Brasilia, marcio@unb.br

Recibido para revisar Octubre 17 de 2007, aceptado Febrero 23 de 2008, Versión final Febrero 25 de 2008

RESUMEN: En este trabajo se presentan los resultados del análisis químico de elementos mayores y trazas para muestras tomadas en la margen occidental del Batolito de Santa Marta. También se describe petrográficamente el batolito, incluyendo sus facies félsicas, máficas y diques pegmatíticos asociados. Con los resultados de estos análisis químicos, llevados a arcano-gramas y de discriminación tectonomagmática propuestos por Pearce *et al.* (1984) y Pearce (1996), sumado a las relaciones de campo encontradas, se propone un Arco Magmático para el ambiente de formación del batolito. Una edad U-Pb convencional de 51.57 ± 1.3 Ma confirma la presencia del magmatismo paleógeno en esta zona.

PALABRAS CLAVE: Sierra Nevada de Santa Marta, Batolito de Santa Marta, U-Pb, elementos mayores, elementos traza.

ABSTRACT: In this paper are show results of major and trace elements chemical analysis for samples taken over western border of Santa Marta Batholith. Further petrographics observations for the batholith that include their felsic and mafic facies and pegmatitics dykes. With the results of these chemical analyses, carried to spider and tectonomagmatic settings diagrams proposed by Pearce *et al.*, (1984) and Pearce (1996), added field relations founds, it suggest a Magmatic Arc for the batholith setting formation. U-Pb convencional age of 51.57 ± 1.3 Ma confirm the presence of the Paleogene magmatism in this area.

KEYWORDS: Sierra Nevada de Santa Marta, Santa Marta Batholith, U-Pb, major elements, trace elements.

1. CONTEXTO REGIONAL

El macizo montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra en el extremo norte de Colombia, aproximadamente entre los $72^{\circ}30'$ y

$74^{\circ}30'$ de longitud oeste y entre los $10^{\circ}0'$ y $11^{\circ}30'$ de latitud norte. Se trata de un gran bloque montañoso separado de la cadena andina por una extensa planicie aluvial y bordeado en

uno de sus flancos por el mar Caribe. Sus límites se definen por la cuenca del bajo Magdalena, la cuenca del Cesar y la línea de costa del mar Caribe. Estructuralmente, se encuentra

demarcado por la falla Santa Marta-Bucaramanga al occidente, la falla de Oca al norte y el lineamiento del Cesar al suroriente (Figura 1).

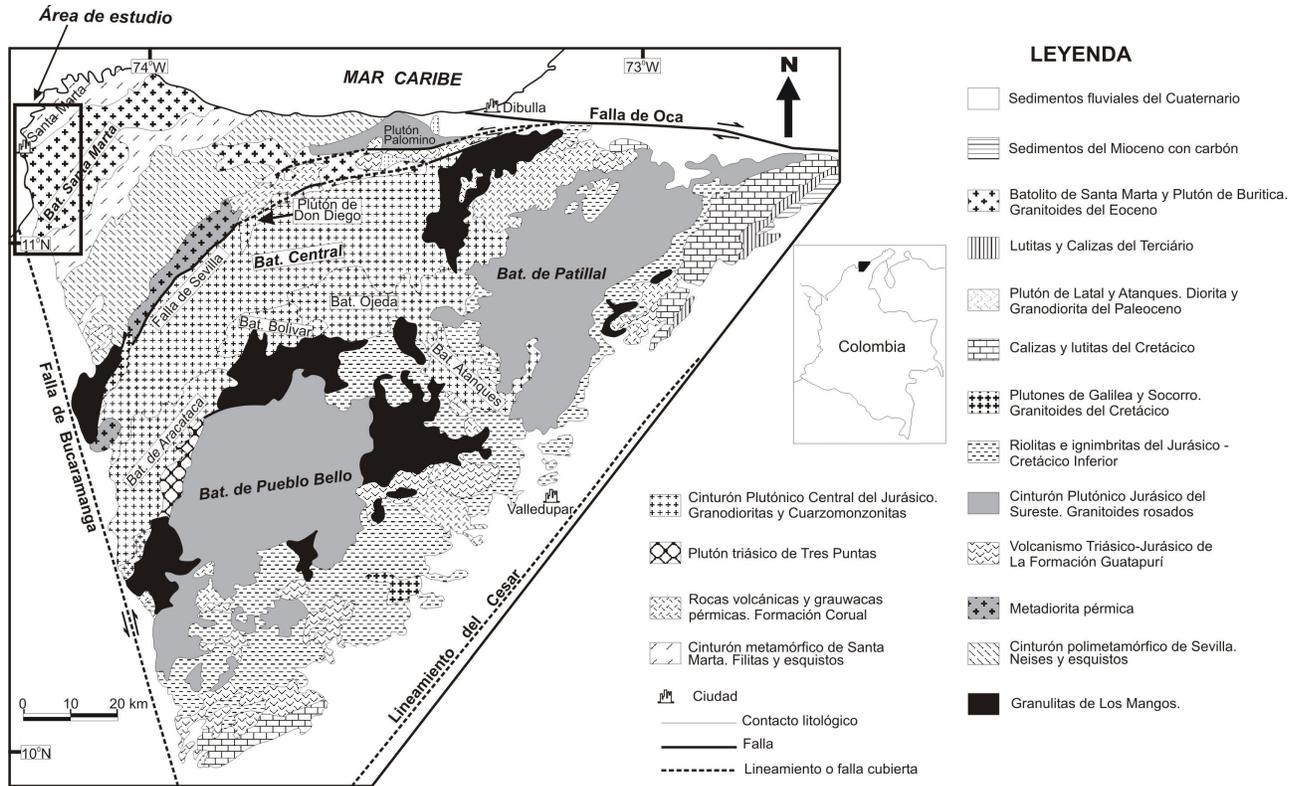


Figura 1. Mapa geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta (modificado de Tschanz *et al.* 1969, 1974)
Figure 1. Geological map of the Sierra Nevada de Santa Marta (modified of Tschanz *et al.* 1969, 1974)

Varias publicaciones con descripciones de las unidades litológicas allí presentes y sus edades radiométricas han sido tomadas en este artículo como referencia (MacDonald y Hurley, 1969; Tschanz *et al.*, 1969, 1974; MacDonald *et al.*, 1971; Restrepo-Peace *et al.*, 1997; Ordóñez *et al.*, 2002, Cordani *et al.*, 2005)

Para Tschanz *et al.*, (1974), el arreglo geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta y de sus zonas aledañas es el producto de la evolución geológica, desde el Pérmico hasta el Eoceno u Oligoceno, de una zona de subducción y fallamiento a lo largo de una antigua margen continental, como consecuencia de la expansión del piso oceánico y de la deriva continental durante la apertura del Caribe y luego del Atlántico sur.

La Sierra Nevada de Santa Marta puede ser dividida en dos diferentes regiones, la región noroeste y la región sureste, separadas por el lineamiento de Sevilla. Este lineamiento pudo haber sido un importante límite de placas desde el Pérmico hasta el Eoceno, a lo largo del cual se desarrolló la faja metamórfica que lleva su nombre, y que controló el emplazamiento y generación de magmas entre el Pérmico y el Jurásico (Tschanz *et al.*, 1969). En los lados opuestos del lineamiento, las rocas del basamento varían en grado metamórfico y edad, y las rocas ígneas plutónicas varían en edad (Tschanz *et al.*, 1974).

Estas regiones están divididas a su vez por tres provincias geotectónicas con series metamórficas distintivas (Tschanz *et al.*, 1969). De occidente a oriente son: Santa Marta, Sevilla

y Sierra Nevada. Las dos primeras están separadas estructuralmente por el sistema de fallas de Guachaca (Toussaint, 1996) y las dos últimas por el lineamiento de Sevilla (Tschanz *et al.*, 1974).

La provincia de Sierra Nevada es la más grande y antigua y se diferencia de las otras dos por la presencia de un basamento Precámbrico (MacDonald y Hurley, 1969; Tschanz *et al.*, 1974; Restrepo-Peace *et al.*, 1997; Ordóñez *et al.*, 2002; Cordani *et al.*, 2005) representado en gneises, granulitas y anfibolitas, y los productos de eventos magmáticos durante el Mesozoico.

La provincia de Sevilla, ubicada al noroeste de la anterior provincia, es esencialmente un cinturón polimetamórfico con tendencia noreste, compuesto de gneises y esquistos, que alberga bloques alóctonos de la provincia de Sierra Nevada, e intruido por rocas plutónicas que datan del Pérmico, Mesozoico y Cenozoico (MacDonald *et al.*, 1971; Tschanz *et al.*, 1974).

La provincia de Santa Marta corresponde a la esquina septentrional de la Sierra Nevada de Santa Marta y está comprendida por dos cinturones metamórficos con tendencia noreste de esquistos y anfibolitas separados por el Batolito de Santa Marta. Los metamórficos han registrado edades del Mesozoico mientras que los plutónicos del Cenozoico Inferior a Medio (MacDonald *et al.*, 1971; Tschanz *et al.*, 1974).

2. GEOLOGÍA LOCAL

El área cartografiada se encuentra ubicada en el borde occidental de la provincia de Santa Marta, estudiada en detalle por Gansser (1955), Radelli (1962), MacDonald y Hurley (1969), Tschanz *et al.* (1969, 1974), Doolan (1970), Doolan y MacDonald (1976), Mejía y Santa (2003). La zona comprende los poblados de Minca, El Rodadero, Gaira y Don Jaca, entre los municipios de Santa Marta y Ciénaga en el departamento del Magdalena. Las unidades litológicas de la zona corresponden a rocas metamórficas regionales dispuestas en fajas de tendencia noreste, coincidiendo con la dirección de los cinturones metamórficos de la región; el Batolito de Santa Marta, emplazado en ellas conservando la misma tendencia direccional de los cinturones metamórficos; un pequeño plutón

granítico en el margen costero, y diques pegmatíticos que atraviesan tanto a las rocas metamórficas como al intrusivo batolítico.

Rocas Metamórficas

Las metamorfitas se diferencian por su composición mineralógica, textura dominante y disposición estructural. Las rocas metamórficas al Este del cuerpo batolítico son predominantemente anfibolitas, mientras que las del margen Noroeste corresponden a esquistos y a anfibolitas diopsídicas.

Anfibolitas: Esta unidad aparece al sureste del batolito, como lentes alargados con tendencia noreste rodeados por la masa batolítica o bien como techos colgados en ésta. Son rocas foliadas de grano medio a fino con un marcado bandeo composicional de hornblenda-plagioclasa. Como rasgo distintivo esta roca presenta considerables contenidos de esfena orientada según la foliación. En estas rocas se conservan localmente pliegues isoclinales intrafoliales, con desarrollo de bandas leucocráticas pinchadas sobre sus planos axiales marcando una transposición en la esquistosidad por plegamiento (Figura 2 a).

Su relación con el Batolito de Santa Marta es intrusiva, con formación de migmatitas de inyección en las zonas de contacto como producto del emplazamiento del ígneo y la asimilación parcial del cuerpo metamórfico a través de sus planos de foliación. Las migmatitas de inyección alcanzan extensiones superficiales de centenares de metros cuadrados, conservando la disposición estructural del cuerpo metamórfico (Figura 2 b).

Anfibolitas diopsídicas: Esta unidad aflora al noroeste de la zona de estudio, desde el borde costero en Bahía Gaira hasta los cerros El Rodadero y La Llorona, en forma de cuerpo elongado con tendencia noreste y buzamiento vertical. Son rocas foliadas de grano medio a fino con bandeamiento composicional persistente y paralelo, definido por bandas de hornblenda y plagioclasa. Pliegues intrafoliales isoclinales son reconocibles mesoscópicamente y texturas de “pinch & swell”, milimétricos a centimétricos de minerales leucocráticos, son comunes en esta unidad. La presencia de dióxido, clinozoisita y calcita la diferencian de

la unidad de anfibolitas ubicadas al este del Batolito de Santa Marta. Silos graníticos que superan el metro de espesor y diques de menor tamaño cortan estas anfibolitas.

Esquistos: Bajo esta unidad se agrupan series de esquistos verdes, cuarzomíáceos, grafitosos y anfibolitas. En el área de estudio se localizan en los cerros Santo Cristo y San Fernando, entre El Rodadero y Santa Marta, y en el cerro La Gloria al sur de El Rodadero. Estas series se presentan en fajas alternadas repetitivas conservando la disposición estructural vertical dominante. Los esquistos verdes y anfibolitas, que dominan la serie, se componen principalmente de actinolita/hornblenda, clorita y epidota, con bandas continuas de esfena paralelas a la foliación. Las metamorfitas pelíticas se componen principalmente de biotita-cuarzo o moscovita-cuarzo, con contenido variable de grafito. Segregaciones de cuarzo centimétricas a métricas son comunes en estas series con estructuras de “pinch & swell”. Elipsoides de dimensiones métricas de actinolita fibrosa son frecuentes en este cuerpo. Pliegues “chevron”, con planos axiales de rumbo noreste y buzamientos aproximados a los 70°, aparecen localmente en los esquistos verdes sin, al parecer, reproducirse intrafolialmente.

Rocas ígneas

El principal cuerpo ígneo es el Batolito de Santa Marta. Asociado a él se encuentran intrusiones graníticas que forman pequeños cuerpos satélites en el borde noroccidental de la zona de estudio, diques pegmatíticos emplazados linealmente, con una destacable persistencia en su orientación, y segregaciones hornbléndicas zonales al interior del orógeno.

Batolito de Santa Marta. Aflora en la zona de estudio como un cinturón con tendencia noreste emplazado entre las rocas metamórficas ya descritas. Se trata de un cuerpo plutónico cuarzodiorítico con variaciones transicionales a granodiorita y cuarzomonzodiorita, de grano grueso y predominantemente alotromórfico, a veces orientado localmente. El batolito intruye las rocas metamórficas de la margen oriental a través de sus planos de foliación y envolviéndolas en forma de lentes en una escala

mayor, generando una zona de borde en la que alternan el cuerpo plutónico, las migmatitas de inyección y las anfibolitas. No se observaron estructuras de deformación sobre el cuerpo metamórfico como consecuencia del emplazamiento (Figura 2 c).

En la región del río Toribío y la quebrada Marinca, el batolito presenta variaciones composicionales hacia el este que van desde cuarzomonzodiorita hasta diorita, con un aumento gradual de segregaciones hornbléndicas puntuales. Sin embargo, diferencias sustanciales de composición y fábrica entre el cuerpo batolítico general y la facies diorítica presente en esta área no fueron observadas. Segregaciones hornbléndicas con desarrollo pegmatítico también fueron vistas en la quebrada Don Jaca y sobre el río Gaira.

Facies granítica. Un cuerpo plutónico de composición granítica y de tamaño de grano medio a fino se presenta en la margen noroccidental costera del área de estudio, en las localidades del cerro La Gloria y puerto de Gaira. Se trata de un granito de dos micas con evidencias de una fuerte acción dinámica produciendo una textura que llega casi a protomilonítica: intensa reducción de tamaño de grano, sombras de presión de micas sobre plagioclasa y cuarzo, micas en forma de “S” y maclas de plagioclasa dobladas en forma de “U” abierta. A pesar de las texturas dinámicas observadas, la orientación preferente para los esfuerzos no pudo ser determinada.

La relación de éste cuerpo con la anfibolita diopsídica y los esquistos es intrusiva, y su emplazamiento en estos últimos provoca una fuerte deformación de tipo dúctil, además de alteración hidrotermal promoviendo la formación de esquistos talcosos, cloríticos y micáceos. También se reconocen intrusiones de este cuerpo en forma de diques de espesores centimétricos a métricos que se muestran plegados al igual que los metamórficos que los contienen.

Diques pegmatíticos. En el área de estudio, a excepción de la parte noroccidental, aparecen diques pegmatíticos que van desde unos pocos centímetros hasta dimensiones métricas de espesor. Estos cuerpos planares tienen una fuerte

persistencia lineal con tendencia predominantemente noreste y buzamientos en ambos flancos de su rumbo. En la margen noroccidental estas intrusiones cesan y su frecuencia disminuye de sur a norte. Composicionalmente, corresponden a granitos y,

eventualmente, algunos de ellos presentan hornblendas de grano grueso en agregado columnar en el contacto con el cuerpo batolítico en su facies diorítica. Los mejores afloramientos de estos cuerpos tabulares se encuentran en los ríos Córdoba y Toribío (Figura 2 d).

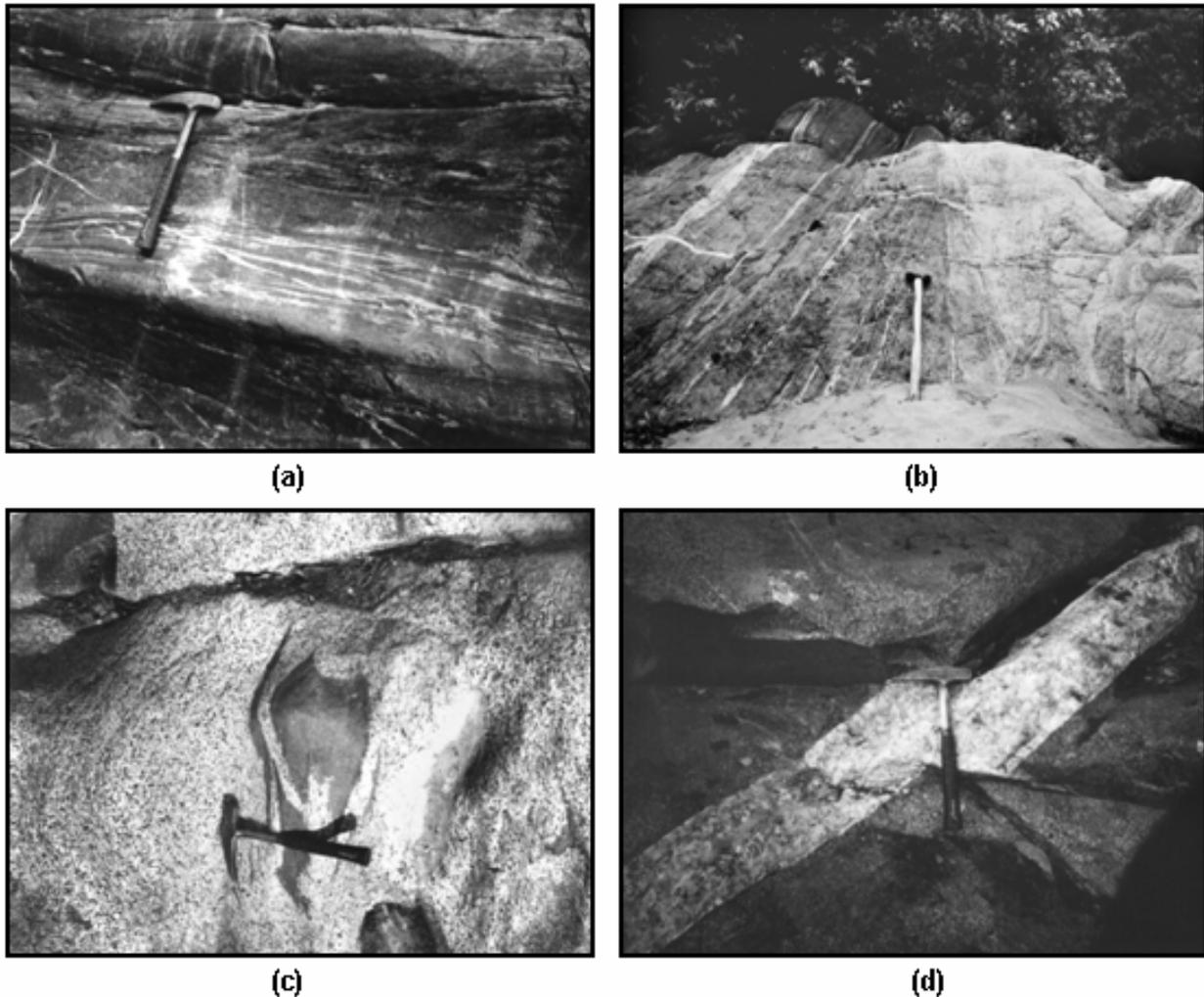


Figura 2. Batolito de Santa Marta y rocas asociadas: (a) Anfíbolita. (b) Migmatita de inyección. (c) Batolito con xenolito de anfíbolita. (d) Dique pegmatítico

Figure 2. Santa Marta Batholith and hosted rocks: (a) Amphibolite. (B) Injection Migmatite. (C) Batholith with xenolite of amphibolite. (D) Pegmatite dike

3. PETROGRAFÍA

La siguiente descripción microscópica se realizó sobre seis (6) secciones delgadas elaboradas en el Laboratorio de Pulidos y Secciones Delgadas y analizadas en el Laboratorio de Petrografía del Carbón de la Facultad de Minas de la

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. El análisis de las rocas ígneas incluye un conteo promedio de 300 puntos por sección para determinar su contenido modal y el tipo de roca según los diagramas de Streckeisen (1976). La clasificación del tipo de plagioclasa, donde pudo ser determinada, se realizó según el método

de Michel-Lévy sobre 10 cristales como mínimo en cada sección delgada. En la Tabla 1 se presentan los contenidos modales de las muestras descritas.

Batolito de Santa Marta

Roca fanerítica, inequigranular, alotromórfica, con tamaños de grano grueso a medio.

Plagioclasa: generalmente es la especie mineralógica con mayores tamaños. Se muestra anhédrica a subhédrica con hábito tabular, pero puede presentarse poiquilítica en hornblenda o biotita. Exhibe maclas tipo Albita, Carlsbad y Periclina, muchas veces con evidencias de deformación y en cuña. En algunas secciones la plagioclasa maclada se muestra cumulática. Eventualmente, los cristales presentan una insinuada zonación. La extinción ondulatoria es común y por lo general siempre está en cristales no maclados. El tipo de plagioclasa varía entre An32 y An34.

Cuarzo: sus tamaños varían de medio a fino. Se presenta completamente anhédrico con bordes irregulares suturados en contacto con plagioclasa y otros cuarzoes, también puede presentarse poligonizado y fracturado. Exhibe una fuerte extinción ondulatoria. Ocasionalmente, poiquilítico respecto a la plagioclasa y hornblenda. Inclusiones de circones grandes son comunes.

Feldespatos potásicos: se presenta anhédrico con contactos suturados con las otras especies y raramente en cristales aislados. Exhibe textura peritítica. En algunas secciones el feldespato muestra extinción ondulatoria mientras que en otras es apenas notable.

Hornblenda: de tamaño grueso y completamente anhédrica, muchas veces con textura esquelética cuando altera a biotita, también puede encontrarse poiquilítica respecto a la plagioclasa. Exhibe un clivaje distintivo. Muchas veces con maclado y ésta, ocasionalmente, polisintética. Bordes irregulares rodeados por epidota, biotita y clorita todos como alteración. Puede presentar tanto extinción ondulatoria como homogénea.

Biotita: el desarrollo cristalino varía de anhédrico a subhédrico, con hábito tabular o arracimada. Puede mostrar extinción completa u ondulatoria dependiendo de la muestra. La biotita como alteración de la hornblenda se reconoce por tener extinción incompleta. Es común encontrarla acompañada de esfena. Es el mineral que mejor muestra los efectos dinámicos sobre la roca, evidenciado por texturas de cizalla en forma de "S", foliación doblada y fuertemente fracturada. Su principal alteración es clorita.

Esfena: generalmente anhédrica y esquelética en tamaños diminutos, también arracimada. Se muestra asociada a los opacos y bordeando a la biotita.

Minerales de alteración: la epidota se presenta como mineral de alteración en plagioclasa o en los bordes de las hornblendas, y generalmente se presenta asociada a la clorita y clinzoisita también de alteración. Las principales zonas de alteración que contienen epidota se encuentran en zonas deformadas de la muestra.

Minerales accesorios: aparece rutilo acicular apostado sobre el cuarzo, de tamaño diminuto. El apatito se presenta euhédrico en cristales columnares de tamaño fino.

Tabla 1. Composición mineralógica modal de diferentes muestras del Batolito de Santa Marta

Table 1. Modal mineralogical composition of different samples of the Santa Marta Batholith

Muestra	Roca	Ubicación	Coordenadas		Composición mineralógica modal (%)							
			Latitud (N)	Longitud (W)	Q	A	P	Hb	Bi	Mv	Es	Otros
SM18A	Pegmatita	Q. Marinca	11°3'3.8"	74°10'13.5"	29	40	12	-	7	6	-	6
SM18B	Diorita	Q. Marinca	11°3'3.8"	74°10'13.5"	3	2	47	25	13	-	3	8
SM22	Cuarzomonzodiorita	Don Jaca	11°8'21.1"	74°12'18.0"	11	6	54	16	8	-	-	5
SM30	Melanogranodiorita	Río Gaira	11°9'14.4"	74°9'52.7"	18	7	34	8	21	-	2	12
SM35	Hornblenda con P	Río Gaira	11°9'37.9"	74°10'21.7"	-	-	3	63	19	-	3	14
SM39A	Granito	C. La Gloria	11°10'39.5"	74°14'8.0"	31	16	31	-	12	4	-	6

Q: Cuarzo; A: Feldespato Potásico; P: Plagioclasa; Hb: Hornblenda; Bi: Biotita; Mv: Moscovita; Es: Esfena; Otros: Minerales de alteración y opacos, clorita, epidota, apatito, etc.

Hornblenda con plagioclasa

Esta descripción corresponde a las segregaciones hornbléndicas que acompañan al Batolito de

Santa Marta, las cuales pueden alcanzar extensiones de varios metros cuadrados.

Es una roca fanerítica, hipidiomórfica e inequigranular. Los granos son predominantemente gruesos, también los hay finos y medios.

Hornblenda: subhédrica a anhédrica, predominantemente de tamaño grueso. Después de la biotita es la especie mineralógica de mayor tamaño. El contacto con otros minerales es irregular, pero también se destacan algunos poligonales con bordes muy finos. Son comunes los cristales esqueléticos. A veces intercumulática respecto a la biotita. Son comunes las maclas bien definidas.

Biotita: euhédrica a subhédrica con formas tabulares. Sus cristales alcanzan los mayores tamaños. Se presenta cumulática o también como reemplazamiento de la hornblenda. Evidencia deformación y presenta extinción ondulatoria.

Plagioclasa: completamente anhédrica y sólo presenta macla de Albita. Muestra extinción ondulatoria. Su intensa alteración a saussurita no permitió la determinación del tipo de plagioclasa, pero quizás esta alteración indique su afinidad al rango cálcico.

Cuarzo: anhédrico en tamaño medio y en pocas cantidades. Presenta extinción homogénea.

Minerales de alteración: la biotita puede aparecer como alteración de la hornblenda y a su vez ésta se encuentra parcialmente cloritizada. La calcita siempre aparece como alteración de la plagioclasa en donde se reconocen maclas para los ejemplares grandes. En general subhédrica a anhédrica en tamaños medios a finos. Una considerable cantidad de epidota aparece como alteración de la plagioclasa y muy asociada a la calcita.

Minerales accesorios: la esfena se presenta subhédrica en tamaños gruesos y anhédrica en medios y finos. Se aloja en los intersticios de la hornblenda o también poiquilítica en ella. Presencia de finos cristales de rutilo dispersos en la muestra.

Granito

Roca fanerítica, alotromórfica, hialal. Predominan los granos de tamaño grueso pero en los bordes de estos siempre hay cristales de menor tamaño.

Plagioclasa: anhédrica de tamaño grueso a fino. Por lo general maclado según Albita y Carlsbad, en cuña o dobladas llegando incluso a formas de

“U” abierta. Exhibe planos de arrastre. Eventualmente zonada. Algunas desarrollan sombras de presión de biotita y clorita.

Cuarzo: completamente anhédrico de tamaño grueso a fino. Exhibe contactos suturados y extinción fuertemente ondulatoria. Presenta poligonización y textura mortero evidenciado una fuerte acción dinámica. También aparece poiquiloblástico respecto a la plagioclasa.

Feldespatos potásico: anhédrico, con bordes irregulares y tamaño de grano medio. Se diferencia de la plagioclasa por no mostrar maclas y presentar una leve textura pertítica, pero en general es difícil separarlas. Exhibe fuerte extinción ondulatoria. El contacto con plagioclasa y cuarzo es suturado.

Biotita: completamente anhédrica, siempre intersticial bordeando cristales de plagioclasa y cuarzo o llenando cavidades. Registra los efectos dinámicos de la roca evidenciados por texturas de cizalla en forma de “S” y extinción fuertemente ondulatoria. Algunas pequeñas biotitas euhédricas, de forma tabular, aparecen poiquilíticas respecto a la plagioclasa.

Moscovita: anhédrica, intersticial y rodeando minerales. Evidencia formas dinámicas: extinción fuertemente ondulatoria, plegada en forma de “S” y como bordes de presión de la plagioclasa. Excepcionalmente hay moscovitas tabulares con doblamientos muy fuertes. También se encuentra poiquilítica respecto al feldespatos potásico.

Minerales de alteración: la epidota y la clorita son minerales de alteración de la plagioclasa, la primera es de tamaño fino y se encuentra también acompañando a la biotita.

Minerales accesorios: apatito en diminutos cristales euhédricos y rutilo acicular fino.

Pegmatita

Roca pegmatítica alotromórfica.

Microclina: grandes cristales anhédricos con textura pertítica y una distintiva macla de su tipo. Son los minerales de mayor tamaño en la sección y exhiben una fuerte extinción ondulatoria. Presenta inclusiones de moscovita orientada en dos direcciones oblicuas a la orientación de la textura pertítica. Eventualmente se presenta micrográfica con clorita.

Cuarzo: anhédricos como granos fragmentados con contactos suturados o penetrativos. Los cristales de mayor tamaño muestran extinción ondulatoria intensa y eventualmente con textura mirmequítica. Puede contener moscovita vermicular.

Plagioclasa: es la especie con los tamaños más pequeños, con formas subhédrica a anhédrica. Los cristales presentan extinción ondulatoria. Algunos exhiben macla tipo Albita que también se reconoce en las bandas gruesas de la plagioclasa en exsolución dentro de la microclina.

Biotita: se encuentra arracimada localmente, también tabular en grandes dimensiones y alterada a epidota y clorita.

4. GEOQUÍMICA

Para el análisis geoquímico se seleccionaron tres muestras del batolito en sus facies granodiorítica, diorítica y granítica, así como también una pegmatita y dos anfibolitas pertenecientes a la roca encajante del orógeno. El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio NEGLABISE de la Universidad Federal de Pernambuco (Brasil), por el método Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X con tubo de Rh. En las Tablas 2 y 3 se presentan los valores obtenidos. Dada la baja cantidad de muestras analizadas, como también el bajo número de elementos traza obtenidos, los resultados aquí mostrados deben ser considerados como indicativos más no concluyentes.

Tabla 2. Química de elementos mayores del Batolito de Santa Marta y anfibolitas encajantes
Table 2. Chemical of major elements of the Santa Marta Batholith and hosted amphibolites

Muestra	Roca	Lat (N)	Long (W)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ T	P.F.	Total
SM39A	Granito	11°10'39.5''	74°14'8.0''	70.53	16.05	0.95	3.08	0.06	4.68	1.37	0.36	0.05	2.58	0.82	100.53
SM23	Granodiorita	11°6'9.9''	74°11'55.9''	61.52	16.67	2.55	5.91	0.12	3.96	1.7	0.53	0.26	6.23	0.47	99.92
SM18B	Diorita	11°3'21.1''	74°10'6.5''	57.71	16.31	4.03	7.79	0.17	3.73	0.71	0.75	0.32	8.07	0.44	100.03
SM1B	Pegmatita	11°1'13.2''	74°11'2.8''	74.91	14.52	0.32	2.57	0.01	5.2	0.64	0.04	0.02	0.45	0.42	99.1
SM10B	Anfibolita	11°1'19.4''	74°10'17.9''	49.2	16.89	3.98	9.53	0.14	3.56	0.65	1.31	0.22	13.54	0.5	99.52
SM14	Anfibolita	11°8'22.7''	74°7'18.6''	62.45	16.22	2.70	5.92	0.13	3.99	1.07	0.55	0.23	6.52	0.27	100.05

La composición está dada en porcentaje en peso.

Tabla 3. Contenido de elementos traza del Batolito de Santa Marta y anfibolitas encajantes
Table 3. Contents of trace elements of the Santa Marta Batholith and hosted amphibolites

Muestra	Roca	Lat (N)	Long (W)	Ba	Cr	Nb	Ni	Rb	Sr	Y	Zr
SM39A	Granito	11°10'39.5''	74°14'8.0''	725	<10	<10	23	48	403	15	146
SM23	Granodiorita	11°6'9.9''	74°11'55.9''	1089	10	8	38	37	634	19	226
SM18B	Diorita	11°3'21.1''	74°10'6.5''	436	22	6	15	11	661	12	145
SM1B	Pegmatita	11°1'13.2''	74°11'2.8''	1524	<10	<10	21	11	545	<10	57
SM10B	Anfibolita	11°1'19.4''	74°10'17.9''	212	22	1	50	6	508	20	112
SM14	Anfibolita	11°8'22.7''	74°7'18.6''	517	26	<10	74	31	642	16	173

El contenido de elementos traza está dado en ppm. Los valores <10 son tomados como equivalentes a 5 de aquí en adelante para efectos de cálculo.

Índices de Elementos Mayores

Las muestras SM18B y SM23 referentes a diorita y granodiorita respectivamente, registran un Índice de Saturación de Aluminio (ISA = $Al_2O_3/[CaO + Na_2O + K_2O]$ molar) inferior a 1.0 indicando un carácter composicional metaluminoso. Por el contrario, las muestras SM1B y SM39A correspondientes a la pegmatita y al granito presentan valores en el campo peraluminoso, levemente por encima del límite con el campo metaluminoso (Figura 3).

Para el Índice de Alcalinidad (IA = $[SiO_2 \text{ \%}]$ cuando $[CaO = Na_2O + K_2O] \text{ \%}$ en peso) de las mismas muestras, se obtuvo un valor de 63 perteneciente al rango cálcico (Figura 4).

Elementos Trazas

Los valores de elementos trazas fueron comparados con valores reportados por Pearce *et al.* (1984) para diversos granitoides de ambientes tectónicos típicos: Granitoides de Arco Volcánico (GAV), Granitoides sin-Colisionales (Gs-Col), Granitoides pos-Colisionales (Gp-

Col), y Granitoides Intra-Placa (GIP). Los patrones geoquímicos (Figura 5 a, b, c, d, e) fueron normalizados según valores de un Granitoide de Ridge Oceánico (GRO) hipotético (Pearce, 1984). Cabe anotar que los patrones originales abarcan la secuencia completa de elementos K₂O, Rb, Ba, Th, Ta, Nb, Ce, Hf, Zr, Sm, Y e Yb; pero aquí se presentan para los valores de los elementos establecidos en la Tabla 3, más el K₂O de cada muestra analizada.

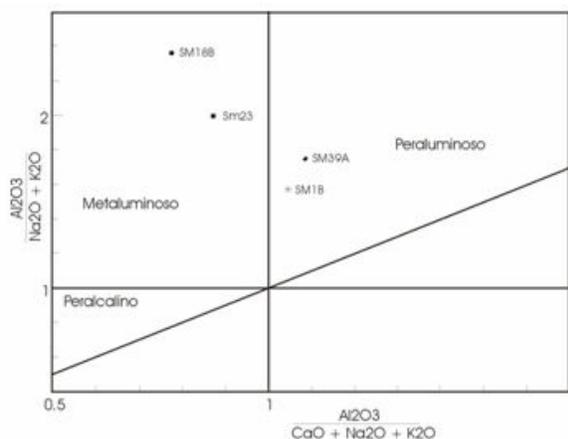


Figura 3. Campos establecidos según el Índice de Saturación de Aluminio. Los valores corresponden a cantidades molares

Figure 3. Fields established according to the Saturation Index Aluminum. The values are for amounts molars

Diagrama Rb-(Y + Nb)

Los valores de Rb, Y y Nb fueron introducidos en un diagrama de discriminación (Figura 5 f) según Pearce *et al.* (1984) y Pearce (1996), para la determinación del ambiente tectónico. Los valores de estos elementos ubican al batolito, al cuerpo satélite granítico y a la pegmatita en el campo de Granitoides de Arco Volcánico.

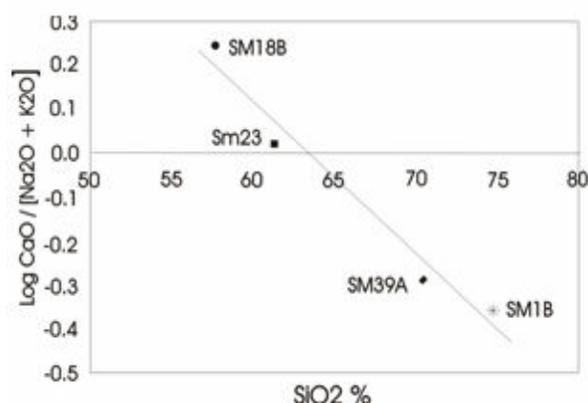


Figura 4. Índice de Alcalinidad (IA). El IA se determina por la cantidad de SiO₂ cuando CaO es igual a Na₂O+K₂O. Los valores están en porcentajes en peso

Figure 4. Alkalinity Index (AI). The AI is determined by the amount of SiO₂ when CaO equals Na₂O + K₂O. The values correspond to percentages by weight

5. GEOCRONOLOGÍA Y GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

Los datos isotópicos Sm-Nd (Tabla 4) presentan valores que son concordantes con el tipo de roca que se estudia e indican preliminarmente que el magmatismo que origino los materiales ígneos que conforman el batolito son el producto de la

mezcla de fuentes manto derivadas ($\epsilon_{Nd(60\text{ Ma})}$ de 0.62 y 0.67) con fuentes corticales ($\epsilon_{Nd(60\text{ Ma})}$ de -1.88 y -2.65), característica que es común en batolitos cordilleranos y que ha sido reportada para otros cuerpos ígneos en los Andes colombianos (Ordóñez 2001).

Tabla 4. Datos Sm-Nd del Batolito de Santa Marta. Incertidumbres 1σ en la razón isotópica $^{143}Nd/^{144}Nd < 0.005\%$, $^{147}Sm/^{144}Nd < 0.1\%$ y $^{87}Sr/^{86}Sr < 0.01\%$. El valor $\epsilon_{Nd(T)}$ fue calculado para una edad de 60 Ma

Table 4. Sm-Nd values of the Santa Marta Batholith. 1σ uncertainties for the isotopic ratio $^{143}Nd/^{144}Nd < 0.005\%$, $^{147}Sm/^{144}Nd < 0.1\%$ y $^{87}Sr/^{86}Sr < 0.01\%$. The $\epsilon_{Nd(T)}$ was calculated for an age of 60 Ma

Muestra	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd (\pm 2SE)$	$\epsilon_{Nd(60)}$	T _{DM} (Ga)	$^{87}Sr/^{86}Sr$
SM 1B (pegmatita)	3,064	18,641	0,0993	0,512464±16	-2,65	0,78	0,70508±2
SM 18B (granodiorita)	3,779	17,045	0,1340	0,512697±7	1,63	0,67	0,70465±2
SM 23 (granodiorita)	4,291	19,597	0,1323	0,512718±8	2,05	0,62	0,70479±2
SM 39A (granito)	3,732	19,418	0,1162	0,512510±7	-1,88	0,84	0,70572±3

Esta característica isotópica bien puede ser el resultado de la mezcla del magma original con las rocas metamórficas que sirven de encajante al batolito, o ser indicativo de la presencia de dos magmas isotópicamente diferentes, que se mezclaron en algún momento de la historia magmática de esta intrusión, los cuales hoy en

día, son cartografiados como una solo unidad. Resolver estas hipótesis requiere de un trabajo orientado a ello, pero de todas formas la heterogeneidad isotópica no puede ser ignorada y más cuando los afloramientos nos informan de la heterogeneidad y complejidad magmática de esta intrusión (Figura 6).

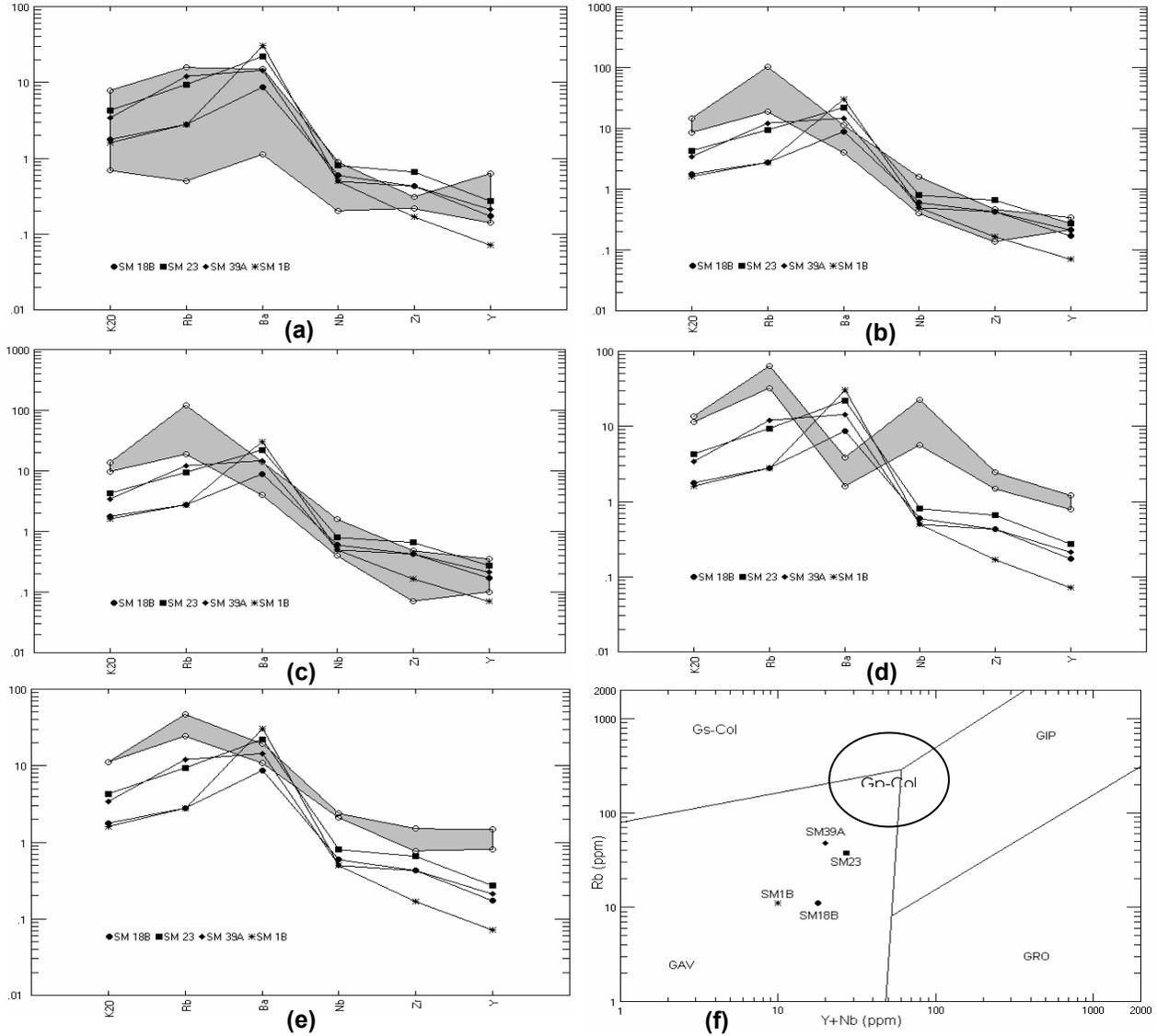


Figura 5. Patrones normalizados relativo a Granito de *Ridge* Oceánico [GRO], comparados con patrones de granitoides normalizados (en gris) de ambientes tectónicos establecidos por **Pearce et al.**, (1984). **(a)** Granitoides de Arco Volcánico (GAV). **(b)** Granitoides pos-Colisionales (Gp-Col). **(c)** Granitoides sin-Colisionales (Gs-Col). **(d)** Granitoides Intra-Placa (GIP). **(e)** Granitoides Intra-Placa [con corteza continental atenuada]. **(f)** Ambiente tectónico en diagrama Rb-(Y+Nb)

Figure 5. Patterns normalized on Granite Ridge of Ocean [GRO] compared to normalized patterns of granitoids (gray) of tectonic settings established by **Pearce et al.**, (1984). **(a)** Volcanic Arc granitoids (GAV). **(b)** Post-Collisional Granitoids (Gp-Col). **(c)** Syn-Collision Granitoids (Gs-Col). **(d)** Intra-plate Granitoids (IPM). **(e)** Intra-plate Granitoids [with attenuated continental crust]. **(f)** Tectonic setting in Rb-(Y + Nb) diagram

Tschanz *et al.* (1974) reportan dos edades K-Ar para una cuarzodiorita del batolito de Santa Marta, las cuales arrojaron edades de 44.1 ± 1.6 Ma (biotita) y de 48.8 ± 1.7 (hornblenda). Esta muestra fue colectada en $11^\circ 17'$ Norte y $73^\circ 56'30''$ oeste.

Para este trabajo y sobre la vía que comunica a Santa Marta con Riohacha, en la entrada al Parque Tayrona (km 30.5), se colectó una muestra de cuarzodiorita (10 kg aproximadamente) en las coordenadas: $11^\circ 16'$

$55''$ de latitud Norte y $73^\circ 55' 13.6''$ de longitud oeste. De esta muestra se obtuvo un concentrado, a partir del cual, se separaron los cristales de circón con técnicas convencionales de gravedad (DENSITEST®) y magnética (separador isodinámico FRANTZ).

La purificación final se hizo en el microscopio binocular seleccionando circones de la fracción no magnética y tomando aquellos libres de inclusiones y fracturas.



Figura 6. Rocas híbridas que muestran la complejidad magmática del Batolito de Santa Marta. Km 9, vía Santa Marta-Riohacha

Figure 6. Hybrid rocks that show the magmatic complexity of the Santa Marta Batholith. Santa Marta-Riohacha road, Km 9

Los circones fueron disueltos en HF y HNO₃ (HF:HNO₃ = 4:1) y posterior al tratamiento químico las muestras se analizaron en el espectrómetro de masa multicolector Finnigan MAT-262 de la Universidad de Brasilia (Brasil) cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Con

estos datos se obtuvo una edad U-Pb convencional de 51.57 ± 1.3 Ma y MSWD = 4.8 (Figura 7). Esta edad, es un poco más antigua que la obtenida por el método K-Ar y representa la edad de cristalización del Batolito de Santa Marta.

Tabla 5. Datos U-Pb obtenidos para tres fracciones de circones del batolito de Santa Marta
Table 5. U-Pb dates obtained by three zircon fractions of the Santa Marta Batholith

BSM 6	U ppm	Pb ppm	Th ppm	Pb206/ Pb204 (obs)	Pb207*/ U235	Pb206*/ U238	Coef. Correl. (rho)	Pb207*/ Pb206*	Edad Pb206*/ U238	Edad Pb207*/ U235	Edad Pb207*/ Pb206*
D1	174,28	1,5225	463,8	688,722	0,052604	0,008134	0,9351	0,046901	52,227	52,056	44,182
D4	87,267	946,93	345,6	142,2857	0,050388	0,007911	0,8439	0,046197	50,794	49,916	7,9249
D5	123,41	1,0272	395,1	601,4689	0,050331	0,007859	0,8596	0,046447	50,465	49,861	20,894

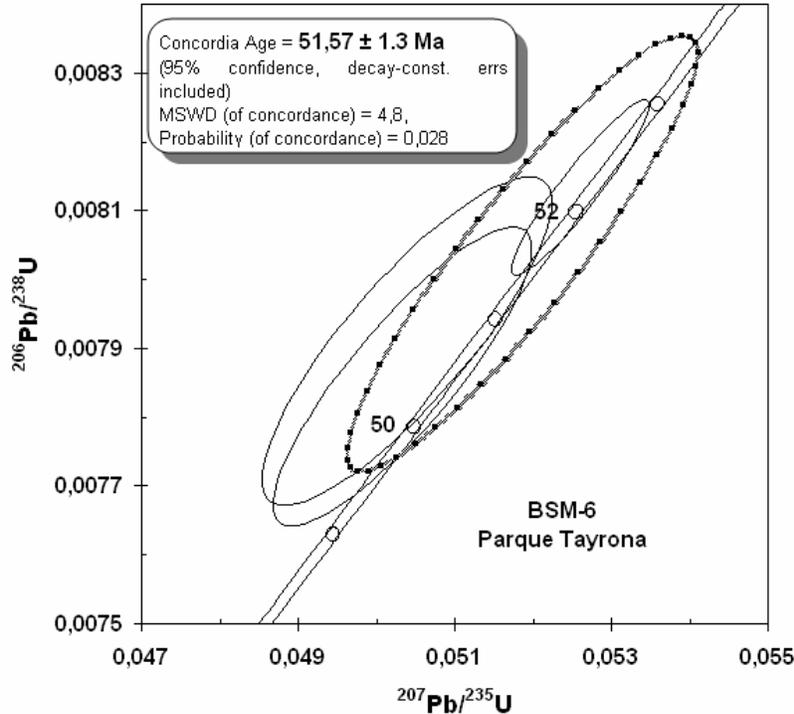


Figura 7. Diagrama de la concordia U-Pb para el Batolito de Santa Marta
Figure 7. U-Pb concordia diagram for the Santa Marta Batholith

6. DISCUSIÓN

A pesar de que la facies granítica (sm39A) se diferencia de la masa batolítica por la forma en que intruye las rocas metamórficas, su mineralogía, fábrica, y su Índice de Saturación de Aluminio (ISA >1), es evidente la relación geoquímica existente entre esta entidad y el cuerpo batolítico dados los patrones de elementos trazas mostrados en la Figura 5. La existencia de este componente peraluminoso derivado del magma principal que formó el cuerpo batolítico, podría ser resultado de la cristalización fraccionada del magma predominantemente metaluminoso, o quizás producto de la asimilación de material de afinidad cortical durante el ascenso del fluido magmático al nivel de emplazamiento. De igual forma, los diques pegmatíticos también podrían estar vinculados al magma formador del batolito quizás como una fase final de cristalización levemente enriquecida en álcalis y fluidos acuosos. Sin embargo, no puede descartarse que existan varios pulsos magmáticos o bien mezcla

de magmas, unidades que aparecen hoy formando el batolito como una sola entidad.

Para el caso de las cuatro muestras analizadas [SM1B, SM18B, SM23 y SM39A] los patrones que mejor se ajustan según el ambiente tectónico de formación corresponden al de Granitoides de Arco Volcánico (GAV) y a los Granitoides Colisionales (Gp-Col y Gs-Col) (Figura 5 a, b, c). Sin embargo, en el diagrama Rb-[Y+Nb] (Figura 5 f) se observa su afinidad al campo de Arco Volcánico, definido principalmente por una baja cantidad de los elementos Y y Nb (pertenecientes al conjunto de iones HFS) que señalan una fuente mantélica empobrecida. Si bien es común que los cuerpos ígneos que pertenecen a este ambiente tectónico tienden a ser de carácter calco-alcalino ($56 < IA < 61$), el resultado aquí obtenido ($IA = 63$) podría ser consecuencia de la asimilación de las anfibolitas pertenecientes a la roca encajante, las cuales presentan cantidades levemente superiores en CaO y levemente inferiores en K_2O y Na_2O que las muestras ígneas (ver Tabla 2), lo que modificaría la composición global del magma

formador haciendo que éste se desplazase al rango cálcico del índice.

La ausencia de deformación en las rocas del cinturón metamórfico asociada al batolito, sugiere que el emplazamiento de éste fue de tipo pasivo, quizás aprovechando fallas profundas que siguen una tendencia noreste similar a la falla de Sevilla (Mejía y Santa, 2003).

La formación de las migmatitas de inyección y el tipo de rocas metamórficas circundantes al cuerpo reflejan condiciones mesozonales para la intrusión del cuerpo ígneo. En contraste, la facies granítica sí exhibe deformación tanto en la roca encajante como en ella misma, además de los efectos metasomáticos en las rocas metamórficas que circundan esta entidad, lo cual indicaría una posición hacia un nivel estructural superior respecto del batolito.

Varios modelos evolutivos de la región del caribe hacen referencia a una convergencia de placas correspondiente al desplazamiento de la paleo-Placa Caribe hacia el flanco norte de la Placa Sudamericana para el Paleoceno tardío-Eoceno temprano (Pindell *et al.*, 1988; Meschede y Frisch, 1988; Ross y Scotese, 1988; Giunta *et al.*, 2002), tiempo del cual se tienen edades radiométricas para el batolito de Santa Marta (edad U-Pb convencional de 51.57 ± 1.3 Ma) y los cuerpos ígneos asociados a éste (Tschanz *et al.*, 1974). Siguiendo estas ideas, es factible que el Batolito de Santa Marta esté indicando la existencia de un arco magmático dentro de esta margen convergente, consecuencia de la fusión de manto en un zona de subducción allí presente.

7. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo hace parte de dos proyectos de investigación (1) “Metamorfismo y magmatismo en el sector norte de la Cordillera Central” y (2) “Metalogenia y Evolución Tectono-Magmática del sector nororiental de la Cordillera Central y la parte sur de la Serranía de San Lucas en los departamentos de Antioquia y Bolívar”, financiados por el DIME y DINAIN de

la Universidad Nacional de Colombia. Se agradece especialmente a las Universidades brasileñas de Pernambuco y Brasilia por la colaboración en la realización de los análisis.

REFERENCIAS

- [1] CORDANI, U., CARDONA, A., JIMÉNEZ, D.M., LIU, D., NUTMAN, A. Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. *Terrane Processes of the Margins of Gondwana*, Geological Society, London, Special Publications, 246: 329-346. 2005.
- [2] DOOLAN, B. L. The Structure and Metamorphism of Santa Marta Area, Colombia, South America. Ph.D. Dissertation. Binghamton, New York. New York State University. 1970.
- [3] DOOLAN, B. L. & MacDONALD W. D. Structure and Metamorphism of Schists of the Santa Marta Area, Colombia. *Memorias Congreso Colombiano de Geología – Bogotá*, 1969. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 1976.
- [4] GANSSER, A. Ein Beitrag zur Geologie und Petrographie der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien, Sudamerika). *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*. 35 (2): 209-279. 1955
- [5] GIUNTA, G.; BECCALUVA, L.; COLTORTI, M.; SIENA, F. VACCARO, C. The Southern Margin of the Caribbean Plate in Venezuela: Tectono-Magmatic Setting of the Ophiolitic Units and Kinematic Evolution. *Lithos*. 63: 19-40. 2002
- [6] MACDONALD, W. D.; DOOLAN, B. L. and CORDANI, U. G. Cretaceous-Early Tertiary Metamorphic K-Ar Age Values Front South Caribbean. *Geological Society of America Bulletin*. 82 (5): 1381-1388. 1971.

- [7] MACDONALD W. D. & HURLEY P. M. Precambrian gneisses from northern Colombian, South America. *Geological Society of America Bulletin*. 80: 1867-1872. 1969.
- [8] MEJÍA, P. E. y SANTA, M. A. Cartografía Geológica del Piedemonte Noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Entre los Ríos Gaira y Córdoba (Santa Marta y Ciénaga, Magdalena). Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2003.
- [9] MESCHEDÉ, M. & FRISH, W. A Plate Tectonic Model for the Mesozoic and Early Cenozoic History of the Caribbean Plate. *Tectonophysics*. 296: 269-291. 1988.
- [10] ORDÓÑEZ, O. Caracterização isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magmáticos nos Andes Colombianos. Tesis de Doctorado (inérita). Universidad de Brasilia. 176 p. 2001.
- [11] ORDÓÑEZ, O.; PIMENTEL, M. M. y DE MORAES, R. Granulitas de Los Mangos, un Fragmento Grenvilliano en la Parte Oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Separata)*. 26 (99): 169-179. 2002.
- [12] PEARCE, J. A. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*. 19 (4): 120-125. 1996.
- [13] PEARCE, J. A.; HARRIS, N. B. W.; TINDLE, A. G. Trace Elements Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*. 25 (4): 956-984. 1984.
- [14] PINDELL, J.; CANADE, S.; PITMAN, W.; ROWLEY, D.; DEWEY, J. LABRECQUE, J. & HAXBY, W. A Plate-Kinematic Framework for Model of Caribbean Evolution. *Tectonophysics*. 155: 21-138. 1988.
- [15] RADELLI, L. Introducción al Estudio de la Geología y de la Petrografía del Macizo de Santa Marta (Magdalena-Colombia). *Geología Colombiana*. (2): 41-115. 1962.
- [16] RESTREPO, P.A.; RUIZ, J.; GEHRELS, P. and COSCA, M. Geochronology and Nd Isotopic Data of Grenville-Age Rocks in the Colombian Andes: New Constraints for The Late Proterozoic-Early Paleozoic Paleontological Reconstructions of The Americas. *Earth Planetary Science Letters*. (150): 427-441. 1997.
- [17] ROSS, M. I. & SCOTESE, C. R. A Hierarchical Tectonic Model of the Gulf of México and Caribbean Region. *Tectonophysics*. 155: 139-168. 1988.
- [18] STRECKEISEN, A. To Each Plutonic Rock its Proper Name. *Earth Science Review*. (12): 1-33. 1976.
- [19] TOUSSAINT, J. F. Evolución Geológica de Colombia: (3) Cretácico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1996.
- [20] TSCHANZ, C. M.; MARVIN, R. F.; CRUZ B. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) - Informe 1829. INGEOMINAS, Bogotá. 1969.
- [21] TSCHANZ, C. M.; MARVIN, R. F.; CRUZ B., J.; MEHNERT, H. H. and CEBULA, G. T. Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*. 85: 273-284, 1974.