

Caracterización petrográfica, geoquímica y petrogenética de los Gabros Hornbléndicos expuestos en La Carolina (Guallupe). Implicaciones regionales en la configuración de la cordillera occidental septentrional del Ecuador.

Edgar Chulde¹

1 Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. (Quito, Ecuador) e-mail: edgar.chulde@hotmail.com.ec, geovacf@gmail.com

RESUMEN

El artículo muestra datos petrográficos y geoquímicos de los cuerpos intrusivos que afloran en el poblado de La Carolina, los cuales presentan composiciones básicas a intermedias (48.22-54.86 wt%SiO₂). En general, estas rocas exhiben microtexturas hipidiomórficas granulares con cristales equigranulares de plagioclasa cálcica (An₆₀₋₇₂), anfíbol ± clinopiroxeno ± ortopiroxeno ± opácos y en ocasiones olivino. Los anfíboles son principalmente hornblendas, las cuales se encuentran orientadas y entrecrecidas a manera de estructura fluidal. El contenido porcentual de anfíboles en las rocas corresponde al 44%, valor que determina la denominación de gabros hornbléndicos. Además, el estudio micropetrográfico muestra que los intrusivos reportados en este trabajo son muy similares en aspectos texturales y mineralógicos al Gabro San José que aflora al este de San José de Tambo. Por otra parte, análisis geoquímicos petrológicos de los intrusivos máficos, determinan afinidades toleíticas de arcos primitivos o de islas y aparentemente constituyen las raíces de un complejo volcánico debido al tamaño de grano y la menor densidad de nucleación mineral. Los datos geoquímicos ploteados en diagramas multielementales spider exhiben una clara relación entre los gabros hornbléndicos con las doleritas que conforman el arco Macuchi sensu-stricto, lo cual indica una petrogénesis común, constituyendo una clara evidencia que el arco paleo-eoceno continua en la Cordillera Occidental Septentrional del Ecuador. Finalmente, se descarta la idea que el arco Macuchi únicamente se encuentra al oeste de la Falla Chimbo-Toachi, ya que en la zona de estudio, estas intrusiones gábricas se ubican al Este.

Palabras clave: Arco Macuchi, dolerita, gabro, hornblenda, afinidades toleíticas, diagramas multielementales spider.

ABSTRACT

This article exhibits petrographic and geochemical data of the intrusives that outcrop near of La Carolina town, which present basic to intermediate compositions (48.22-54.86 wt% SiO₂), generally the rocks show granular hypidiomophe microtextures with equigranular crystals of plagioclase Ca (An₆₀₋₇₂), amphibole ± clinopyroxene ± orthopyroxene ± opaque and sometimes olivine. Amphiboles are mainly hornblende, which are oriented and intertwined as a fluid structure. The percentage of amphiboles in the rocks corresponds to 44%, a value that determines the denomination of gabbro "hornblendite". In addition, the micropetrographic studies shows that the intrusives reported in La Carolina are very similar in textural and mineralogical aspects to Gabro San José, which appears east of San José de Tambo. Moreover, petrological geochemical analyzes of the mafic

intrusives, determine toleíticas affinities of primitive arcs or island and apparently constitutes the roots of a volcanic complex due to the grain size and the lower density of mineral nucleation. In addition, the

geochemical data plotted in normalized multi-elementary diagrams, show a clear relation between the amphibole gabbros with the dolerites that conform the Macuchi arc sensu-stricto, which indicates that present a common petrogenesis, being clear evidence the paleo-eocene arc extends into Northern Ecuadorian Andes. Finally, we discard the idea that the Macuchi arc is only to the west of the Chimbo-Toachi Fault, since, in the zone of study, these gabbroic are located to the East.

Keywords: Macuchi arc, dolerite, gabbro, hornblende, tholeiitic affinities, multielement diagrams spider.

1. Introducción

La Cordillera Occidental del Ecuador se encuentra constituida por terrenos alóctonos de naturaleza oceánica, que se han acrecionado al margen sudamericano a finales del Campaniano (Luzieux et al., 2006; Vallejo et al., 2006). Estos terrenos alóctonos son el resultado de varios procesos relacionados con el volcanismo intraplaca y con zonas de convergencia, estas últimas forman arcos volcánicos insulares y continentales desarrollados sobre el basamento oceánico desde el Maestrichtiano hasta la actualidad. La extensión de los arcos de edad paleógena se encuentran limitados a pocas exposiciones en afloramientos, debido a la cobertura volcánica cuaternaria que dificulta establecer la continuidad y la disposición hacia los Andes Septentrionales del Ecuador, como es el caso del arco Macuchi de edad paleoceno – eoceno (Vallejo, 2007) que se encuentra claramente expuesto entre las latitudes 0°-2°30'S de la Cordillera Occidental, mientras que en el sector norte de la Cordillera, la presencia de unidades geológicas relacionadas con el arco volcánico no ha sido reportada. Sin embargo, Vallejo (2007) y posteriormente Chulde (2014) plantean la existencia del arco basados en edades radiométricas y sucesiones estratigráficas respectivamente. El presente artículo exhibe datos petrográficos y geoquímicos de los cuerpos intrusivos básicos que afloran cerca del poblado La Carolina (Guallupe) descritos por Chulde (2014). Además, se establece una relación petrogenética con las doleritas reportadas para el arco Macuchi mediante análisis de datos geoquímicos-petroológicos recopilados de Chiaradia (2009).

Contexto Geológico Regional

La Cordillera Occidental del Ecuador forma parte de los Andes Septentrionales y está caracterizada por la

presencia de rocas de origen oceánico, incluyendo: plateau basáltico, arcos de islas, fragmentos ofiolíticos y secuencias volcano-sedimentarias (Figura No. 1). Estas unidades oceánicas son el resultado de varios procesos relacionados con zonas de convergencia y volcanismo intraplaca. Los terrenos oceánicos han sido acrecionados al margen sudamericano desde el Cretácico tardío (Egüez, 1986), constituyendo terrenos alóctonos separados a través de estructuras tectónicas regionales con dirección de rumbo N-S y NE-SW (BGS-CODIGEMM, 1999, 2001). Varios trabajos petrológicos geoquímicos sobre el basamento de la Cordillera Occidental han establecido la presencia de un terreno con afinidades de plateau oceánico (Kerr et al., 2002; Mamberti et al., 2003) denominado Pallatanga que está expuesto en el borde oriental de la Cordillera Occidental separado del margen continental a través de la falla Pallatanga-Pujilí-Calacalí (Hughes y Pilatasig, 2002). La acreción del terreno con la parte continental de Sudamérica ocurrió en el Campaniano-Maestrichtiano (Spikings et al., 2000) y como resultado se obtuvieron reajustes de edades isotópicas (85-65 Ma.) tanto en la Cordillera Real del Ecuador como en la Central de Colombia (Aspden et al., 1992), así como una fuerte deformación de las rocas de la Unidad Yunguilla.

En el norte de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0-1°N de latitud, sobre el plateau oceánico se depositaron lavas y productos volcanoclásticos del arco intraoceánico Río Cala de afinidades toleíticas a calcoalcalinas (Vallejo, 2007; Boland et al., 2000), cuando el slab fue subducido bajo el plateau hacía el occidente, previo a la acreción del Campaniano. Este arco se encuentra relacionado directamente con la Unidad Natividad lo cual sugiere que el arco Río Cala tiene una edad campaniana a maestrichtiana

(Boland etal.,

2000). Después del evento acrecionario, el proceso de subducción varía, el slab va en dirección Este, iniciando la formación del arco subaéreo Silante de edad maestrichtiano?-paleoceno con firmas calcoalcalinas normales y en forma temporal consecutiva, el desarrollo del arco Macuchi de edad paleoceno? – eoceno (Vallejo, 2007). El arco Macuchi consiste en una secuencia predominantemente volcanoclástica (contiene grauvacas, limolitas, con líticos volcánicos, brechas soportadas en clastos, cherts, etc) con intercalaciones de pillow lavas, andesitas, hyaloclastitas, tobas e intrusiones doleríticas (Egüez, 1986).

Además, constituye la parte oeste de la Cordillera Occidental del centro del Ecuador (Kerr et al., 2002, Figura No. 1), y el límite oriental está delimitado por la falla regional Chimbo-Toachi, es decir, el arco se encuentra al oeste de la estructura tectónica (Hughes y Pilatasig, 2002). La falla Chimbo-Toachi de rumbo N-S, constituye una zona de cizalla dúctil de bajo grado con indicadores cinemáticos de movimiento dextral. Además, esta estructura marca la sutura durante la acreción del arco Macuchi contra el margen continental en el Eoceno tardío. La edad del cizallamiento es incierta, sin embargo, análisis radiométricos (K-Ar, hornblenda) en una diorita foliada ubicada dentro de la zona de cizallamiento, dan una edad de 48.28 ± 0.55 Ma (Hughes y Pilatasig, 2002). Esta edad puede representar una etapa temprana del cizallamiento.

La prolongación de la falla Chimbo-Toachi hacia los Andes septentrionales entre $0-1^{\circ}$ N, probablemente constituye la zona de Cizallamiento Mulaute (ZCM), la cual tiene un rumbo variable, pero al norte de San Miguel de los Bancos tiene una orientación NE-SW y constituye un cinturón de hasta 8 km de ancho, con indicadores cinemáticos de movimiento dextral, desarrollando un clivaje penetrativo pizarroso dentro de la unidad geológica del mismo nombre. Hacia el norte del Batolito de Apuela, no se ha podido seguir claramente la continuación de la estructura tectónica (Boland et al., 2000).

Por otra parte, la mayoría de las facies del arco

Macuchi son el producto de erupciones efusivas submarinas a subaéreas de composiciones básicas a intermedias (Hughes y Bermúdez, 1997). Las muestras presentan afinidades geoquímicas de arco de islas con

anomalías negativas de Nb, Ta y Ti (Chiaradia, 2009), no obstante, algunas muestras ricas en Mg pueden ser interpretadas como el producto de un arco primitivo (Kerr et al., 2002). Además, rocas con afinidades geo- químicas de "MORB" en la parte occidental del arco Macuchi probablemente corresponden a rocas de piso oceánico (Lebrat et al., 1987).

Edades eocénicas para el arco han sido reportadas por Egüez (1986) mediante métodos radiométricos (K- Ar, roca total) en andesitas basálticas y por análisis de microfauna radiolaria y foraminífera en turbiditas y calizas, respectivamente.

El arco volcánico Macuchi se asocia con una secuencia sedimentaria de edad paleoceno al eoceno medio que, desde la base hasta la parte superior, comprende brechas con clastos andesíticos y areniscas (Formación Pilaló), calizas marinas (Formación Unacota), litarenitas turbidíticas (Formación Apagua) y conglomerados polimícticos de fan de delta (Formación Rumi Cruz) o "Apagua superior", denominado por Egüez (1986). Esta secuencia sedimentaria ha sido reportada por Chulde (2014) hacia el norte de la Cordillera Occidental. Aunque el contacto entre estos sedimentos denominados en conjunto como Grupo Angamarca y el arco volcánico es a menudo tectónico, se considera que la secuencia sedimentaria es la cubierta estratigráfica del arco paleo-eoceno (Hughes y Pilatasig, 2002).

Con respecto a los cuerpos diabásicos, estos se presentan en forma de diques y pequeñas intrusiones, que se encuentran expuestos cerca del Río Toachi (Hughes y Bermúdez, 1997). Estos cuerpos holocristalinos presentan composiciones basálticas, con cristales sub-equidimensionales de plagioclasa, clinopiroxeno ± hornblenda, definiendo texturas sub-ofíticas. Análisis geoquímicos petrológicos definen firmas toleíticas para

los cuerpos diabásicos (Chiaradia, 2009).

El evento de acreción del arco Macuchi es aún objeto de debate. Períodos de exhumación registrados por Spikings et al. (2000), así como discordancias angulares entre las rocas de la Unidad Macuchi-Grupo Angamarca con el Grupo Zumbagua, indicarían que un evento tectónico acrecionario ocurrió a finales del Eoceno tardío (Hughes y Pilatasig, 2002). Sin

embargo, la acreción del arco Macuchi está en discusión y es fuertemente cuestionada por Vallejo et al. (2009) y Chiaradia (2009), ya que rocas volcánicas de la Unidad Macuchi se presentan en contacto concordante con las turbidíticas pertenecientes al Grupo Angamarca en el tramo vial Pallatanga-Bu-

cay, sin evidenciar ninguna discordancia aparente. Otro argumento, constituye la presencia de zirrones de edad precámbrica-cámbrica dentro de las rocas de la Unidad Macuchi, los cuales según análisis de proveniencia, derivan del cratón Sudamericano y de la emergente Cordillera Real (Vallejo, 2007).

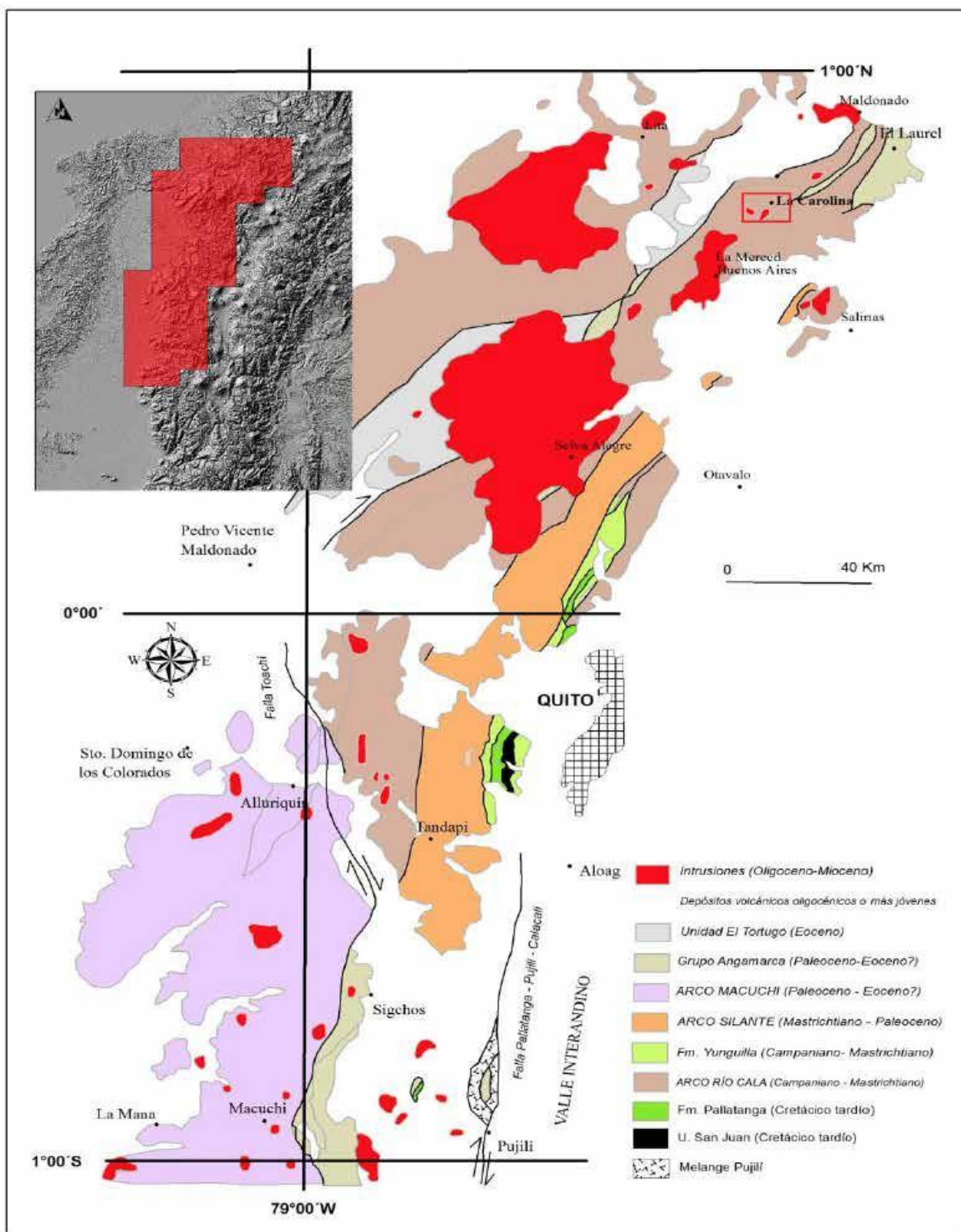


Figura No.1. Mapa geológico simplificado de la Cordillera Occidental del Ecuador entre las latitudes 1°00' N-1°00' S (Modificado BGS-CODIGEMM, 1999, 2001), con la ubicación del área investigada

2. Metodología

Técnicas y análisis de laboratorio

Los datos geoquímicos de roca total, elementos traza y tierras raras reportados por Chulde (2014), fueron obtenidos por el Laboratorio Geocientífico del Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero, Metalúrgico (INIGEMM). El porcentaje en óxidos para elementos mayores se determinó a través del método de Fluorescencia de Rayos X (XRF), en una base previamente seca y pulverizada. Adicionalmente, una porción de muestra fue fundida y luego aforada en una matriz de ácido nítrico al 15% para determinar elementos traza y tierras raras por Espectrometría de Masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). Parte de la muestra también fue digerida en agua regia y analizada por ICP-MS para establecer las concentraciones de metales base. El contenido de elementos mayores está expresado en porcentaje en peso total (wt%), mientras que el contenido de elementos traza, tierras raras y metales base es expresado en partes por millón (ppm). Para la interpretación de los datos geoquímicos, el contenido de los elementos mayores no fue normalizado a una base libre de volátiles, es decir que los valores no fueron recalculados y, para el análisis se consideró el valor del LOI (loss on ignition), esto debido a que los datos geoquímicos serán objeto de comparación.

3. Resultados

3.1 Análisis petrográficos y alteración

Para la caracterización petrográfica se consideró un total de 7 secciones delgadas recolectadas por Chulde (2014) y 1 muestra tomada por el proyecto BGS-CO-DIGEM.

Los cuerpos intrusivos La Carolina presentan composiciones básicas a intermedias (48.22-54.86 wt%- SiO₂) con base en el contenido absoluto de sílice, tal y como se refleja en el diagrama álcalis de Le Bas et al. (1986), en la serie toleítica de afinidad subalcalina (Figura

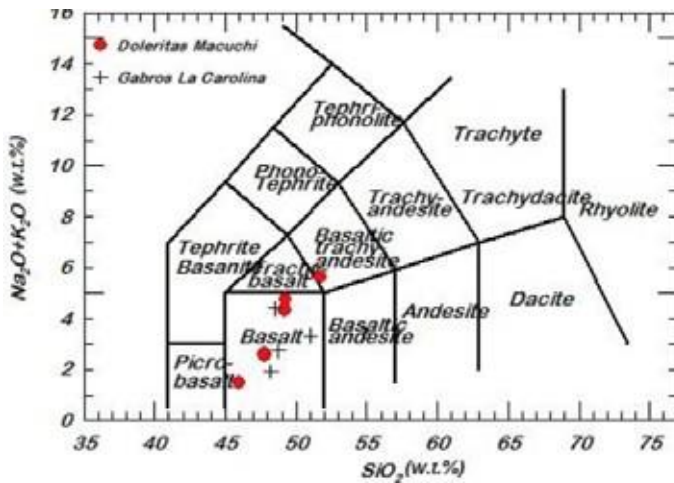
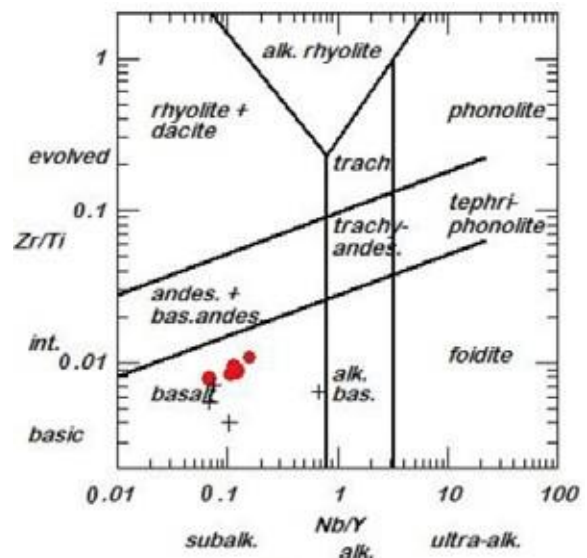


Figura No.2. Diagrama Alcalis de clasificación de rocas magmáticas para los gabros La Carolina y las doleritas del Arco Macuchi (LeBas et al., 1986), donde las muestras son ploteadas en el campo de composición basáltica

Además, en el diagrama logarítmico Zr/Ti vs Nb/Y de clasificación de Pearce (1996), cuatro muestras relacionadas con los intrusivos se distribuyen en el campo de basaltos, muy similar a la composición que presentan las doleritas Macuchi.

Es decir, las intrusiones corresponden principalmente a gabros y, en menor cantidad a dioritas (Figura No.3).

Figura No.3. Diagrama logarítmico Zr/Ti vs. Nb/Y, para las muestras correspondientes a las doleritas del arco Macuchi y a los gabros La Carolina



Los intrusivos son melanocráticos y de grano grueso, contienen del 60 al 80 % de minerales máficos que generalmente exhiben microtexturas hipidiomórficas granulares con cristales equigranulares de plagioclasa cálcica (An56-70), anfíbol \pm clinopiroxeno (augita) \pm ortopiroxeno \pm óxidos-Fe y en ocasiones olivino. Como óxidos de hierro, las rocas contienen magnetita e ilmenita con un contenido porcentual menor o igual a 2. En ciertas zonas de las muestras analizadas,

los gabros presentan microtexturas mirmequíticas. Según análisis microscópicos de luz transmitida, los anfíboles con un tamaño promedio de 1,5 cm, son principalmente hornblendas en tonalidades de verde oliva, los cuales se presentan orientados y entrecrecidos a manera de una estructura fluidal (Figura No.4, Figura No.5). El contenido porcentual de anfíboles en las rocas corresponde al 44%, por esto toman el nombre de gabros hornbléndicos (Tabla No. 1).



Figura No.4. Gabros recristalizados con minerales entrecrecidos de anfíboles de tamaños centimétricos además de clorita, epidota y cuarzo secundario como minerales de alteración

Las intrusiones muestran un gran contenido porcentual de minerales de alteración ($\approx 17\%$), lo cual probablemente se encuentra relacionado con el alto valor de LOI (2.34-4.07wt%), pues, este parámetro indica la cantidad de volátiles presentes en las muestras analizadas.

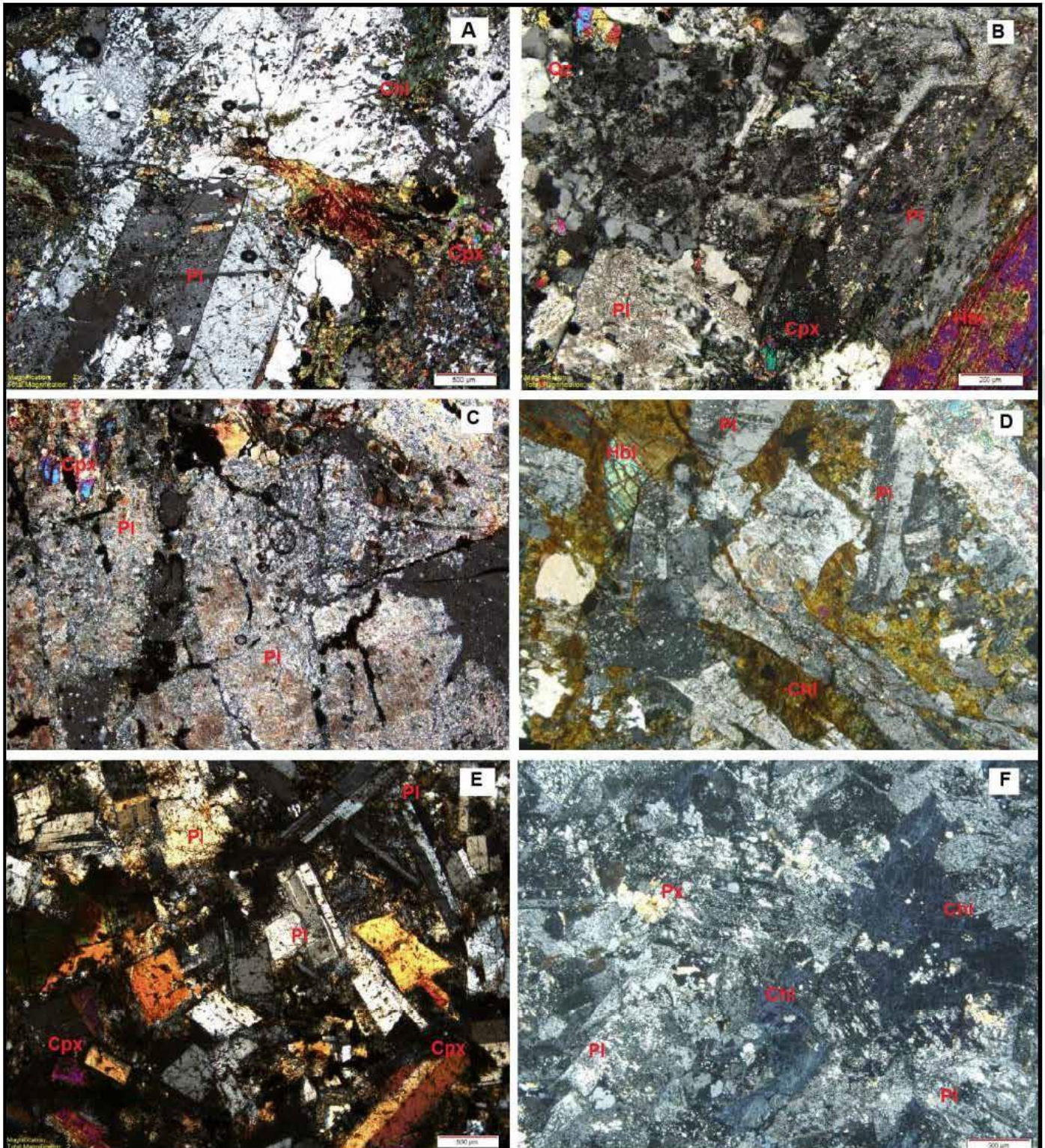


Figura No. 5. Aspecto microscópico, composición mineralógica y textural de los intrusivos La Carolina (A). EC-T31 Diorita de textura hipidiomórfica granular con minerales de Hbl, Pl y Cpx (augita), en la parte izquierda superior presenta una microtextura mirmequítica local. (B). EC-T14 Gabro hornbléndico de textura hipidiomórfica con cristales euhedrales de Pl y Hbl (C). EC-T32 Alteración de plagioclasas a arcillas en una muestra de Diorita (D). EC-T2 Gabro propilitizado con gran desarrollo de anfíboles y plagioclasa cálcica (E). M5-662 Gabro con Pl (An58) y Cpx de textura panidiomórfica (minerales euhedrales) granular (F). EC-T75 Intrusivo básico cloritizado con minerales de plagioclasa cálcica maclada

Tabla No. 1. Composición mineral y texturas de los intrusivos básicos La Carolina.

Muestra	Minerales primarios					Minerales de alteración					Textura	Roca	
	Opx	Cpx	Pl	Amph	Olv	Op	Cal	Ep	Chl	Qz			
EC-T32		x	x			x			x	x		Hipidiomórfica	<i>Diorita alter.</i>
EC-T31	x	x	An ₅₆	x		x			x	x		Hipidiomórfica	<i>Diorita Amph</i>
EC-T14		x	An ₆₀	x				x	x	x		Hipidiomórfica	<i>Gabro Amph.</i>
EC-T75		x	An ₆₉	x	x				x	x		Alotriomórfica	<i>Gabro alter.</i>
M5-662		x	An ₅₈			x			x	x	x	Panidiomórfica	<i>Gabro-Diorita</i>
EC-T6		x	x				x		x	x		Hipidiomórfica	<i>Gabro alter.</i>
EC-T7	x	x	An ₅₈	x					x			Hipidiomórfica	<i>Gabro Amph</i>
EC-T2		x	An ₇₀	x		x			x	x	x	Hipidiomórfica	<i>Gabro Amph.</i>

Como minerales de alteración, las rocas contienen clorita (cloritización), epidota, arcillas y cuarzo secundario producto de la disolución de las plagioclasas como entrecrecimiento micrográfico. Además, los cristales de plagioclasa se encuentran alterados a epidota (saussuritización). En general, las intrusiones se encuentran bajo la acción de restos postmagmáticos formando un vetilleo cruzado de cuarzo hidrotermal recristalizando las rocas.

Por otro lado, los intrusivos básicos exhiben coloraciones ocre-rojizas hacia los bordes, esto indica la presencia de metamorfismo de contacto por efectos del emplazamiento dentro de las rocas de la Unidad Pilatón. Es decir, probablemente las intrusiones son de edad paleocena o, incluso más jóvenes (?).

Análisis por difracción de rayos X (XRD) en areniscas pertenecientes a la Unidad Collapí (la cual se considera probablemente parte de la roca caja superior de los intrusivos máficos), han reportado un alto contenido en zeolitas cálcicas como laumontita, heulandita y chabazita (Chulde, 2014), que son comunes en rocas metamórficas de bajo grado de fondo marino (Winkler, 1976), estableciendo que la roca caja se formó en un ambiente submarino.

Por otra parte, cabe mencionar que la petrografía de los intrusivos gabroicos descrita en el presente trabajo, es muy similar en composición mineralógica-textural al cuerpo intrusivo máfico que aflora al este de San José de Tambo (UTM: 696500-9784000, Psad 56) reportado por Mc Court et al. (1997), quienes denominan al intrusivo como gabro San José. Las rocas que conforman el cuerpo

intrusivo son gabros, microgabros-diabasas, cuarzo-gabros (Tabla No.2) y son relativamente comunes en sitios donde afloran rocas de la Unidad Macuchi (Luis Pilata-sig, comunicación personal).

Tabla No. 2. Petrografía y composición mineralógica del Gabro San José. Tomado de McCourt et al., (1997).

Muestra	Roca	Comp. Mineral
M3PD873	Cuarzo-gabro	Pl, Cpx, Qz, Amph, Op.
M3PD242	Gabro	Pl, Cpx, Op, Amph, Zr.
M3PD245	Gabro	Pl, Cpx, Amph, Op.
M3PD810	Gabro	Pl, Amph, Op.
M3PD866	Gabro	Pl, Px, Amph, Op.
M3PD508	Microgabro	Pl, Amph, Op.
M3PD902	Gabro	Pl, Px, Amph.
M3BX421	Cuarzo-gabro	Px, Pl, Amph, Qz, Op.
M3PD238	Microgabro Qz	Pl, Px, Qz, Op, Amph.

McCourt et al. (1997) interpretan que el gabro San José constituye un nivel más profundo dentro del apilamiento de rocas volcánicas pertenecientes al arco volcánico eoceno Macuchi.

3.2 Análisis geoquímicos de roca total, elementos traza y tierras raras

Para la caracterización geoquímica y petrogenética se consideró un total de 11 muestras con datos geoquímicos, 6 de las cuales están relacionadas con las doleritas reportadas para el arco Macuchi, recopilado de Chiari (2009) como se presenta en la Tabla No.3. Además, 5 de las muestras corresponden a los intrusivos hornbléndicos de La Carolina reportados por Chulde (2014).

Cabe mencionar, que para una muestra de los cuerpos intrusivos gabróticos (EC-T75) no se presentan datos geoquímicos referentes a elementos traza y tierras raras, únicamente se exhibe información concerniente a elementos mayores expresada en óxidos con porcentaje en peso total (Tabla No.4).

Los análisis de datos geoquímicos establecen que los intrusivos máficos gabróticos caen dentro de la serie subalcalina con leves tendencias hacia la serie alcalina, tal y

como se representa en el diagrama de Irvine y Baragar (1971), con contenidos de Na₂O +K₂O no mayores a 4,41 y 5,61 (wt%) para los gabros La Carolina y las doleritas Macuchi, respectivamente (Figura No.6).

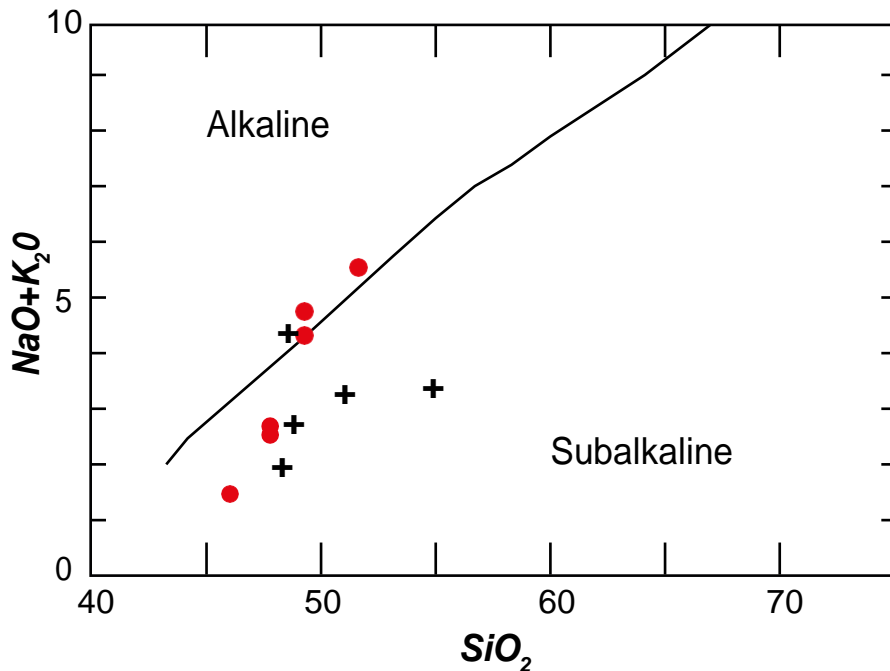


Figura. No.6. Diagrama Na₂O +K₂O vs SiO₂ de Irvine y Baragar (1971) donde las muestras analizadas pertenecientes a los gabros hornbléndicos y las doleritas Macuchi, caen principalmente dentro del campo subalcalino.

Basados en el índice de alcalinidad, las rocas pertenecientes a los intrusivos básicos y a las doleritas corresponden principalmente a la serie toleítica, evidenciado en el diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971). Esta hipótesis es soportada por el diagrama de clasificación de Miyashiro (1974) en donde las muestras

caen reiteradamente en el campo toleítico. Es decir, los cuerpos máficos La Carolina y las doleritas del arco paleo-eoceno presentan firmas geoquímicas toleíticas muy similares, como se exhibe en los diagramas correspondientes y presentados a continuación (Figura No. 7, No. 8).

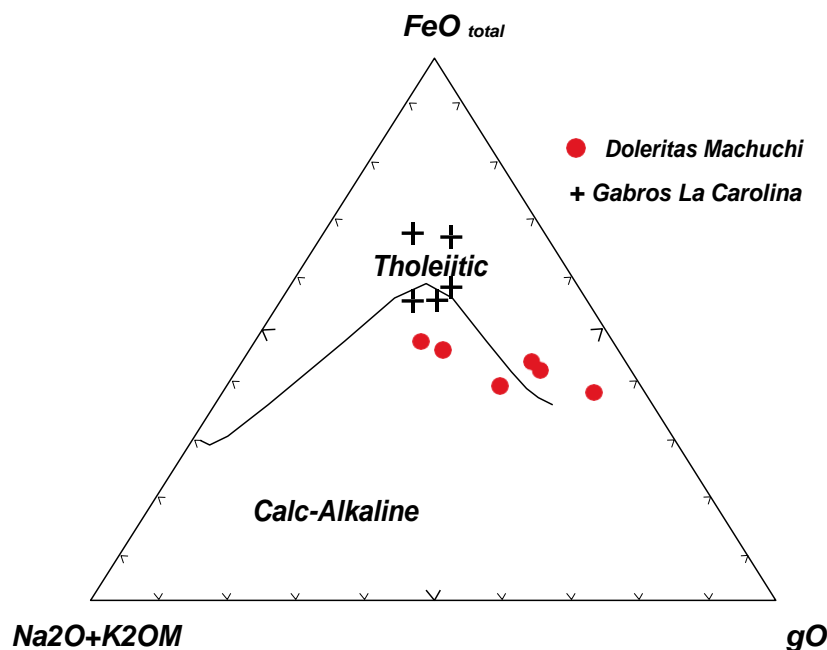
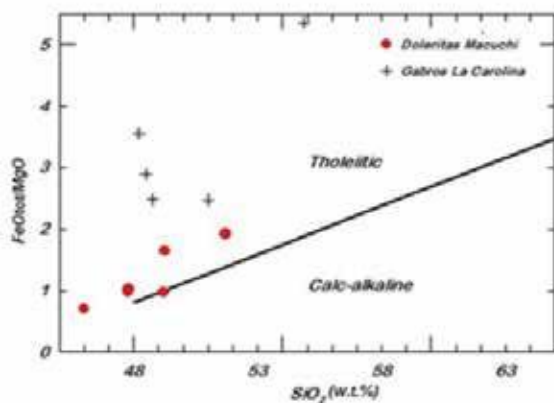


Figura No. 7. Diagrama triangular AFM (Irvine y Baragar, 1971) en el cual 8 muestras analizadas correspondientes a los gabros La Carolina y doleritas Macuchi caen dentro de las series toleíticas y 3 muestras en el campo calcoalcalino.

Tabla No.3. Datos geoquímicos de las doleritas reportadas para el arco Macuchi. Tomado de Chiaradia (2009).

Muestra	TRI-001	TRI-007	TRI-039	TRI-040	TRI-054	TRI-069
Litología	<i>Dolerita</i>	<i>Dolerita</i>	<i>Dolerita</i>	<i>Dolerita</i>	<i>Dolerita</i>	<i>Dolerita</i>
SiO ₂	46.01	47.79	49.22	51.71	49.26	47.82
TiO ₂	0.76	1.12	1.16	1.7	1.34	0.71
Al ₂ O ₃	15.14	16.05	16.11	15.43	15.93	17
CaO	11.77	10.54	7.08	6.65	7.96	11.16
Na ₂ O	1.18	2.15	4.28	5.47	4.64	1.99
K ₂ O	0.29	0.4	0.08	0.14	0.11	0.63
MnO	0.16	0.16	0.17	0.18	0.16	0.16
MgO	10.95	8.49	8.46	5	5.16	8.11
Fe ₂ O ₃	8.54	9.19	9.09	10.69	9.45	9.16
P ₂ O ₅	0.09	0.16	0.14	0.19	0.18	0.08
LOI	4.4	2.71	3.85	2.51	3.13	2.37
Total	99.39	98.84	99.7	99.68	97.33	99.21
Rb	5.0	3.4	1.2	1.7	1.5	5.6
Sr	152	230	165	92	207	212
Y	12	20	19	27	24	13
Zr	38	72	60	92	75	33
Nb	1.3	3.2	2.4	3.4	2.8	0.9
Hf	1.1	1.9	1.6	2.4	2.0	0.9
Pb	2.8	1.1	3.2	2.8	1.8	1.0
Th	0.4	0.8	0.8	1.0	0.8	0.4
U	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Ba	61	138	64	58	47	75
Zn	65	67	90	74	66	54
Cu	20	50	49	39	25	60
Cr	554	424	277	40	62	61
Ni	238	160	108	25	36	42
Sc	45	46	49	35	42	46
V	191	257	292	418	348	222
La	4.6	6.6	6.1	7.6	6.9	4.6
Ce	7.1	13.0	11.5	16.4	13.9	6.3
Pr	1.0	1.9	1.8	2.5	2.0	1.0
Nd	5.6	9.7	8.9	12.7	10.7	5.3
Sm	1.6	2.7	2.6	3.8	3.1	1.7
Eu	0.6	1.0	0.9	1.3	1.2	0.6
Gd	2.0	3.3	3.1	4.4	4.0	2.0
Tb	0.3	0.5	0.5	0.7	0.6	0.3
Dy	2.4	3.7	3.4	5.0	4.4	2.3
Ho	0.4	0.7	0.7	1.1	0.9	0.5
Er	1.4	2.1	2.0	2.9	2.5	1.4
Tm	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2
Yb	1.4	2.1	1.9	2.9	2.5	1.3
Lu	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2

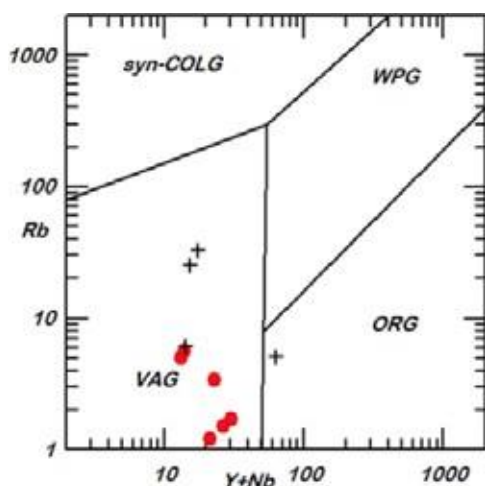


Con respecto al origen o ambiente tectónico de formación, tanto los gabros como las doleritas corresponden a rocas intrusivas e hipoabisales de arco volcánico (Volcanic arc granite) relacionados con márgenes convergentes en zonas de subducción. Para esta discriminación de ambientes tectónicos, se han utilizado las relaciones establecidas por Pearce et al. (1984) como se muestra en la Figura No. 9, quienes

Figura No.8. Diagrama de clasificación de Miyashiro (1974) donde las 11 muestras analizadas pertenecientes a las doleritas Macuchi y a los gabros La Carolina caen dentro del campo toleítico.

Tabla No.4. Datos geoquímicos de los gabros hornbléndicos La Carolina (Gualupe). Tomado de Chulde (2014).

Muestra	EC-T31	EC-T75	EC-T2	EC-T6	EC-T7
Litología	<i>Diorita</i>	<i>Gabro</i>	<i>Gabro</i>	<i>Gabro</i>	<i>Gabro</i>
SiO ₂	54.86	48.22	48.50	51.01	48.78
TiO ₂	1.04	0.66	0.71	0.61	0.60
Al ₂ O ₃	13.76	19.10	19.61	18.58	19.83
CaO	5.68	11.94	9.29	10.19	11.18
Na ₂ O	3.06	1.54	2.88	2.63	2.26
K ₂ O	0.37	0.40	1.53	0.68	0.48
Mn ₂ O ₃	0.25	0.15	0.18	0.21	0.2
MgO	2.19	2.54	3.31	3.48	3.51
Fe ₂ O ₃	13.04	10.04	10.64	9.57	9.67
P ₂ O ₅	0.15	0.12	0.13	0.13	0.12
LOI	3.04	4.07	2.66	2.34	2.63
Total	97.44	98.77	99.44	99.41	99.25
Rb	5.13	----	25.02	32.51	6.12
Sr	159	462,5	313.35	293.59	331.41
Y	37.36	----	14.27	15.82	13.30
Zr	40.21	98.48	30.21	14.65	19.79
Nb	25.56	----	1.07	1.64	0.91
Pb	3.98	11.07	< 0.01	<0.01	<0.01
Th	6.36	----	0.45	1.96	0.37
U	0.81	----	0.19	0.74	0.15
Ba	197	----	181.2	91.92	89.98
Zn	118.90	74.06	37.33	46.77	33.12
Cu	242.8	208.4	121.9	55.87	98.44
Cr	45.58	32.05	9.95	22.47	19.97
Ni	7.05	17.97	10.63	14.21	13.54
Sc	27.62	----	----	----	----
V	233.90	----	----	----	----
La	12.88	----	3.26	10.57	3.30
Ce	13.83	----	----	----	----
Pr	5.08	----	1.28	2.99	1.25
Nd	23.00	----	6.82	14.21	6.61
Sm	6.80	----	2.00	3.38	1.91
Eu	2.52	----	0.79	1.02	0.69
Gd	7.24	----	2.33	3.30	2.18
Tb	1.57	----	0.39	0.49	0.37
Dy	8.35	----	2.61	2.94	2.43
Ho	2.02	----	0.53	0.59	0.50
Er	5.41	----	1.68	1.83	1.57
Tm	1.10	----	0.24	0.25	0.21
Yb	5.51	----	1.61	1.74	1.47
Lu	1.04	----	0.24	0.26	0.22



han considerado tres elementos en traza (Y, Rb y Nb) representados en un diagrama logarítmico y posteriormente soportado por el diagrama triangular de Wood (1980), representado en la Figura No.10.

Figura No.9. Caracterización de los gabros La Carolina y de las doleritas Macuchi en función del ambiente tectónico, (Rb vs Y+Nb). VAG (Volcanic arc granite), syn-COLG (syn collision granite), WPG (within plate granite, anorogenic field), ORG (ocean ridge granite).

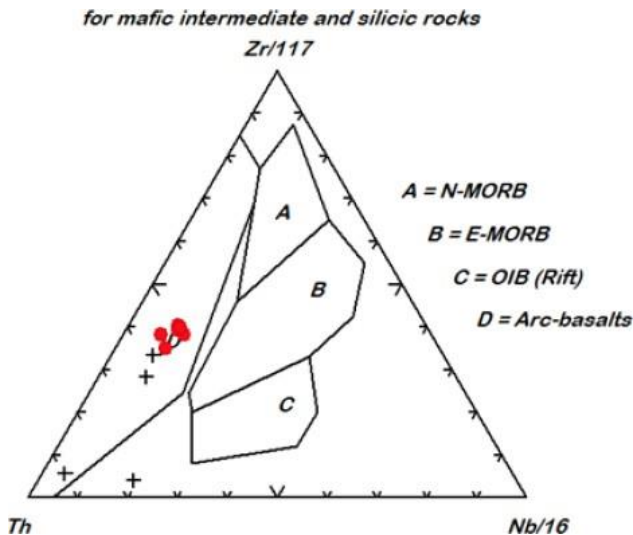


Figura No.10. Diagrama triangular de Wood (1980) donde las muestras pertenecientes a los gabros hornbléndicos y a las doleritas Macuchi caen dentro del campo “Basaltos de arco volcánico”.

En el diagrama Cr vs Y de Pearce (1982) para la discriminación de basaltos, las intrusiones doleríticas del arco Macuchi así como los intrusivos gabróticos La Carolina caen en el campo “VAG” relacionados con basaltos de arco, confirmando el ambiente tectónico de formación de las muestras estudiadas, tal y como se representa en la Figura No. 11.

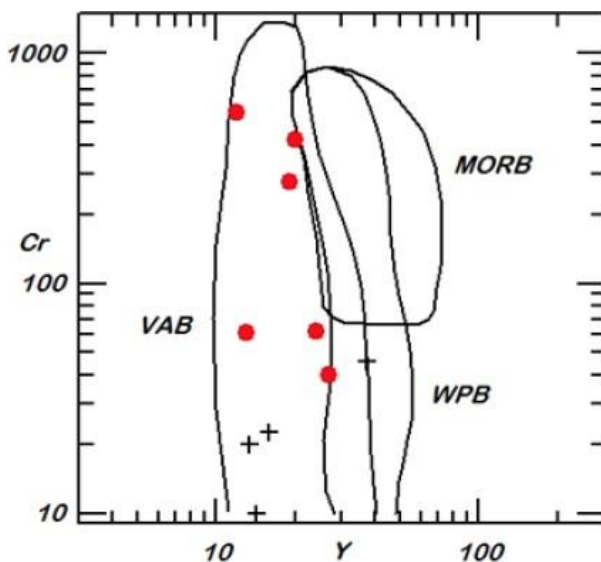


Figura No.11. Diagrama logarítmico Cr vs Y de Pearce (1982) donde se exhibe que 9 muestras caen en el campo de basaltos de arco volcánico mientras que 1 muestra cae en el límite del campo WPG (within plate granite, anorogenic field).

En el diagrama extendido de incompatibilidad de tierras raras de Sun y McDonough (1989) normalizado a N-Morb (Figura No.12 A), los gabros hornbléndicos (cruces en negro) presentan un marcado enriquecimiento en elementos incompatibles LILE (Large ion lithophile elements) de Rb, Ba y Th, así como una baja presencia de elementos incompatibles HFSE (High field strength elements) en Zr, Nb y Ti. Esto podría ser una consecuencia de la contaminación de la cámara magmática con la roca encajante debido al engrosamiento de la corteza (Wilson, 1994). Asimismo, los diagramas spider exhiben picos negativos en Nb y Ti, esto marca una característica típica de las rocas resultantes de magmatismo, sugiriendo la ocurrencia de un proceso de subducción (Rollinson, 1993). Un espectro plano bien marcado entre 0.4-0.6x N-Morb para elementos de tierras raras HREE (High rare earth elements) en Dy, Y, Yb y Lu, es evidenciado también en el diagrama spider normalizado al N-Morb.

Como se observa en la Figura No. 12.A, tres muestras pertenecientes a las intrusiones máficas presentan patrones similares a los espectros que exhiben las doleritas del arco Macuchi, a excepción del contenido de Pb y Ce que no ha sido reportado para los gabros anfibólicos (Tabla No. 4.), el contenido de estos elementos únicamente ha sido obtenido para una sola muestra de las hornblenditas (EC-T31).

Por otra parte, en el diagrama extendido de incompatibilidad de tierras raras normalizado a condrita de Sun y McDonough (1989) (Figura No.12.B), se nota que prácticamente el patrón es plano y, que la concentración de tierras raras livianas (LREE) como La, Pr, Nd y Sm llega hasta el orden de 13x condrita presente en dos muestras y a 50x condrita para una muestra del intrusivo hornbléndico.

En general, los diagramas con patrón plano y que, no exhiben un fraccionamiento de LREE a HREE, sugieren una relación con basaltos primitivos (McCourt et al., 1997) y presentan la misma tendencia que las doleritas reportadas para el arco Macuchi, es decir, indican una petrogénesis común (Figura No 12.B). Además, los espectros

planos entre el orden de 13x y 50x condrita, sugieren que las muestras constituyen intrusiones máficas de afinidad toleítica relacionadas con arcos insulares o arcos continentales primitivos

(Wilson, 1994). Esta idea fue soportada inicialmente por los diagramas de Irvine y Baragar (1971) y Miyas- hiro (1974) (Figuras No.6, No.7, según corresponde). Por otro lado, el espectro relativamente plano en el or- den de 50x condrita, exhibe un empobrecimiento de hasta 22x condrita en el elemento Ce, esto probablemente puede estar relacionado con la incorporación significativa de sedimentos pelágicos y la interacción de agua de mar en el proceso de subducción (Neal y Taylor, 1989), lo que ha desarrollado estos pulsos magmáticos máficos.

De esta manera, las rocas pertenecientes a los cuerpos intrusivos gabróticos no son fraccionadas y posible- mente se relacionan con ambientes toleíticos de arcos primitivos inmaduros.

Una cuarta muestra presenta cierta tendencia donde las tierras raras livianas (LREE) son ligeramente enrique- cidas, disminuyendo levemente su contenido en tierras raras pesadas (HREE), esto indica un mínimo fracciona- miento con respecto a las condritas. Tal fraccionamiento es muy similar a las firmas geoquímicas que se reportan en las lavas del arco Macuchi (Chiaradia,2009).

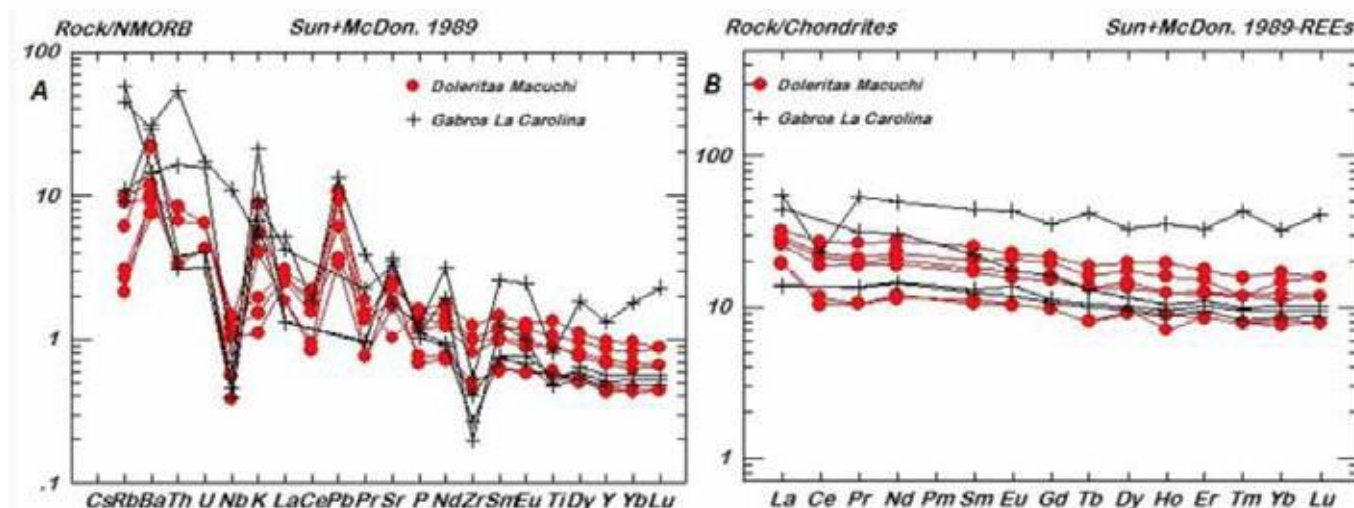


Figura No.12. (A) Diagrama multielemental normalizado al N-Morb (Sun y McDonough, 1989) para los intrusivos básicos (cruces en negro) y las doleritas del arco Macuchi (círculos rojos). (B) Diagrama de tierras raras normalizado a condritas (Sun y McDonough, 1989).

4. Discusiones y Conclusiones

Los cuerpos intrusivos que afloran en la zona de estudio consisten principalmente de gabros (48.22-51.01 wt%SiO₂) con un alto contenido de minerales máficos (60%-80%). Estas rocas presentan microtexturas hipidiomórficas granulares y cristales equigranulares de plagioclasa (An₅₆₋₇₀), anfíbol ± clinopiroxeno. Los anfíboles son hornblendas y su contenido porcentual corresponde al 44% del total de la composición mineral, razón por la cual son denominados gabros hornbléndicos. En general, el tamaño de grano y las microtexturas que presentan las rocas se debe a una tasa de crecimiento mineral relativamente alta frente a una menor densidad de nucleación, cuando el en-

friamiento del fundido magmático es lento y la profundidad de emplazamiento de los cuerpos máficos es

mayor o igual a 4 km.

Las rocas pertenecientes a los gabros anfibólicos no han sido datadas por métodos radiométricos, sin embargo cabe mencionar ciertas consideraciones con respecto a sus edades. Los cuerpos intrusivos máficos descritos, se encuentran emplazados en rocas sedimentarias de edad maestrichtiana (Boland et al., 2000), sobre las cuales se ha desarrollado una aureola asociada con el metamorfismo de contacto producto del emplazamiento. Por otra parte, no constituyen intrusiones relacionadas con los batolitos miocénicos que se encuentran muy cerca de la zona de estudio y, mucho menos, con el volcanismo oligocénico, pues, éstos en conjunto presentan composiciones más ácidas y exhiben afinidades geoquímicas distintas a las que presentan las intrusiones gabróicas. Por todo esto,

es muy probable que los intrusivos básicos de La Carolina sean de edad paleocena a eocena. Además, Van Thournout en INEMIN-AGDC (1990) reporta gabros ricos en hornblendas cerca del sector de Cachaco (A 10 km de distancia de la zona de estudio) y en base a métodos radiométricos (^{40}Ar - ^{39}Ar , hornblenda) sugiere una edad eocénica media (45 ± 9 Ma). Es muy probable que constituyan en cuerpos máficos de similiar naturaleza a los intrusivos reportados en el presente artículo.

Los gabros definidos en la zona de estudio, tienen un origen relacionado con rocas máficas de afinidades geoquímicas toleíticas. Esto es soportado por los análisis microscópicos petrográficos que indican composiciones básicas y por ensayos geoquímicos petrológicos multielementales normalizados a condrita, los cuales establecen un patrón relativamente plano y no exhiben un claro fraccionamiento de LREE a HREE. Además, diagramas spider multielementales normalizados al N-Morb exhiben picos negativos en Nb y Ti, que son características típicas de rocas resultantes del proceso de subducción. Con esto se concluye que, el análisis petrogenético de los datos geoquímicos reportados para los gabros La Carolina y las doleritas del arco Macuchi sensu-stricto, exhibe una petrogénesis común tal y como se representa en varios de los diagramas de clasificación así como en los multielementales spider. Bajo estas consideraciones, los gabros hornbléndicos parecen constituir las raíces de un complejo volcánico de arco primitivo o insular de probable edad paleo-eoceno, es decir, Macuchi.

Consecuentemente, la interpretación de este artículo sugiere la presencia de rocas del arco eoceno representado por la Formación Macuchi en la Cordillera Occidental Septentrional del Ecuador soportado por el hecho que, las intrusiones descritas en este trabajo son muy similares a las doleritas reportadas para el arco Macuchi sensu-stricto y, aparentemente equivalentes en el norte del país, al gabro San José. Probablemente, constituye la continuación del complejo volcánico Santa Cecilia-Las Equis de edad eocénica ubicado al este de la Falla de Junín-Sambiambi, en la Cordillera Occidental Colombiana (INGEOMINAS, 2007).

Por último, si se considera que los gabros anfibólicos La Carolina constituyen las raíces del arco Macuchi, la única forma de que se encuentren emplazados dentro

de la Unidad Pilatón (parte del grupo Río Cala), es que el arco paleo-eocénico constituya un terreno de naturaleza autóctona, lo que constituiría un argumento en contra del evento acrecionario. Por otra parte, se descarta la idea planteada por Hughes y Pilatasig (2002) quienes establecen que el arco Macuchi únicamente se encuentra al oeste de la Falla Chimbo-Toachi, pues, en la zona de estudio estas intrusiones gabróicas se encontrarían al Este.

Agradecimientos

A los profesionales, Dr. Cristian Vallejo y M.Sc. Luis Pilatasig, por las valiosas sugerencias realizadas en la elaboración del artículo, pues, su aporte ha sido fundamental para mejorar el contenido y la calidad del manuscrito.

Al Dr. Arturo Egüez, por las discusiones realizadas respecto a la presencia de los intrusivos y sus posibles orígenes.

Al INIGEMM y a su director ejecutivo, por el apoyo brindado en la publicación del presente trabajo.

Referencias

Aspden, J.A., Harrison, S., & Rundle C. (1992). New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 6, 77-96.

BGS, CODIGEM. (1999). Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0-1°S. Misión británica, CODIGEM, Quito, Ecuador.

BGS, CODIGEM. (2001). Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0-1°N. Misión británica, CODIGEM, Quito, Ecuador.

Boland, M.P., Pilatasig, L.F., Ibandango, C.E., McCourt, W.J., Aspden, J.A., Hughes, R.A., & Beate, B. (2000). *Geology of the Western*

Cordillera between 0°-1°N, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica, Informe No. 10. CODIGEM-BGS, 72 p. Quito-Ecuador.

Chiaradia, M. (2009). Adakite-like magmas from fractional crystallization and melting - assimilation

- of mafic lower crust (Eocene Macuchi arc, Western Cordillera, Ecuador). Elsevier, 265, 468-487.
- Chulde, E. (2014). Estudio geológico del paleógeno en la Cordillera Occidental Septentrional del Ecuador. Provincias de Carchi e Imbabura. Tesis de Grado
– Escuela Politécnica Nacional, No publicada, 100p. Quito - Ecuador.
- Egüez, A. (1986). Evolution Cenozoique de la Cordillere Occidentale septentrionale d'Equateur (0°15' S - 01°10' S), les mineralisations associees. Doctoral Thesis, UPMC, Paris, 116 p. Unpublished.
- Hughes, R., & Bermúdez, R. (1997). Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 0°00' and 1° 00' S. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica. Informe No. 4. CODIGEM – BGS, 75 p. Quito - Ecuador.
- Hughes, R.A., & Pilatasig, L.F. (2002). Cretaceous and Tertiary Block accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador: Tectonophysics, 345, 29-48.
- INGEOMINAS (2007). Geología de la plancha 5-18. Atlas geológico de Colombia. Escala 1: 500 000. Departamentos de Nariño, Cauca, Huila, Cauquetá y Putumayo.
- Instituto Ecuatoriano de Minería-Agencia Gubernamental de Cooperación en Desarrollo INEMIN-AGCD., (1990). Inventario de recursos minerales metálicos en el Noroccidente del Ecuador, Proyecto Desarrollo del Sector Minero en el Ecuador, Tomo I: Investigaciones Geológicas y Metalogénicas, 107 p. Quito - Ecuador.
- Irvine, T., & Baragar, W. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523 – 548.
- Kerr, A.C., Aspden, J.A., Tarney, J., & Pilatasig, L.F. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic Blocks in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. Journal of the Geological Society, 159, 577-594.
- Le Bas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volca-

nic-Rocks based on the Total Alkali Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.

Lebrat, M., Megard, F., Dupuy, C., & Dostal, J. (1987). Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador. *Geological Society of America Bulletin*, 99, 569-578.

Luzieux, L.D.A., Heller, F., Spikings, F., Vallejo, C.F., and Winkler, W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian fore arc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 249, p. 400-414.

Mamberti, M., Lapierre, H., Bosch, D., Ethien, R., Jai-llard, É, Hernández, J., & Polvé, M. (2003). Accreted fragments of the Late Cretaceous Caribbean-Colombian Plateau in Ecuador. *Lithos*, 66, 173-199.

McCourt, W.J., Duque, P., & Pilatasig, L.F. (1997). Geology of the Western Cordillera between 1°-2°S, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información cartográfica y Geológico, Informe No. 3, CODIGEM-BGS, 69 p. Quito - Ecuador.

Miyashiro, A. (1974). Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science* 274, 321-355p.

Neal, C., & Taylor, L. (1989). A negative Ce anomaly in a peridotite xenolith: Evidence for crustal recycling into the mantle or mantle metasomatism? Pergamon Press, 53, 1035-1040. USA.

Pearce, J.A. (1982). Trace elements characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In; Thorpe, R.S (Ed). *John Wiley and Sons, Andesites*, 526-548p.

Pearce, J. A., Harris, N. B. W., & Tindle, A. J. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-83.

Pearce, J.A. (1996). A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A. (Eds.), *Trace element geochemistry of volcanic rocks; applications for massive sulphide exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, 79-113.

- Rollinson, H.R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation*. Longman Scientific y Technical. John Wiley y Sons, Inc., New York, 315 p.
- Spikings, R.A., Seward, D., Winkler, W. & Ruiz, G.M. (2000). Low temperature thermochronology of the northern Cordillera Real, Ecuador tectonic insights from zircon and apatite fission-track analysis: *Tectonics*, 19, 649-668.
- Sun, S., & Mc Donough, W. (1989). Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, Norry (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. London Spec. Pub., 42, 313-345.
- Vallejo, C., Spikings, R.A., Winkler, W., Luzieux, L., Chew, D., and Page, L. (2006). The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American plate: *Terra Nova*, v. 18, p. 264-269.
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the western cordillera in the Andes of Ecuador (late Cretaceous-Paleogene)*. Swiss federal institute of technology Zürich. Doctoral Thesis ETH No. 17023, 208 p. Unpublished.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R.A., Luzieux, L., Heller, F., Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the fore arc of the Andes in Ecuador. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geol. Soc. of Am. Mem. 204:197-216 p.
- Van Thournout, F. (1991). *Stratigraphy, magmatism and tectonism in the Ecuadorian northwestern cordillera: Metallogenic and Geodynamic implications*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 150 p.
- Wilson, M. (1994). *Igneous petrogenesis, A Global Tectonic Approach*. Chapman y Hall London-Great Britain, 416 p.
- Winkler, H. G. F., (1976). *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 4ta y 5ta Edición. Springer-Verlag, Berlín.
- Wood, D. A. (1980). The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 11-30p.