

PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS ANFIBOLITAS DEL CERRO LA COCHA, SIERRA CHICA, CÓRDOBA

Patricia A. ANZIL y Roberto D. MARTINO

CONICET y Cátedra de Geología Tectónica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
E-mails: panzil@com.uncor.edu, rdmartino@com.uncor.edu

RESUMEN

En la Sierra Chica de Córdoba, a dos kilómetros al sur del Observatorio Astronómico de Bosque Alegre, se encuentran dos variedades litológicas de anfibolitas asociadas al cuerpo ultramáfico de La Cocha. Estas variedades incluyen anfibolitas sin piroxeno, compuestas por hornblenda, plagioclasa, titanita y minerales opacos, emplazadas en el núcleo de la estructura plegada del cuerpo ultramáfico. El segundo grupo son anfibolitas con dos piroxenos, compuestas por hornblenda, plagioclasa, ortopiroxeno (En), clinopiroxeno (Di) y como accesorios minerales opacos, apatita, escasa titanita y circón. Estas anfibolitas se encuentran en el encajonante del cuerpo ultramáfico de La Cocha, asociadas a gneises granatíferos sillimaníticos. Con el objetivo de determinar el protolito, que por metamorfismo dieron origen a las anfibolitas, se realizó un estudio geoquímico de roca total. Las anfibolitas con dos piroxenos se clasifican dentro de la serie toleítica y, en base al diagrama de tierras raras se las podría asociar a un ambiente tectónico de generación de tipo N-MORB. Las anfibolitas sin piroxeno, también corresponderían a un ambiente asimilable a N-MORB, con mayor depresión en las tierras raras livianas, sugiriendo probablemente un ambiente de generación del fundido en un manto empobrecido.

Palabras clave: *anfibolita, metamorfismo, geoquímica, La Cocha, Sierra Chica.*

ABSTRACT

Petrography and geochemistry of the amphibolites from La Cocha Hill, Sierra Chica, Córdoba, Argentina

In the Sierra Chica of Córdoba (Argentina), two lithological varieties of amphibolites associated with the La Cocha ultramafic body, crops out two kilometer south of the Bosque Alegre Astronomical Observatory. These varieties include non-pyroxene amphibolite composed of hornblende, plagioclase, titanite and opaque minerals, situated in the core of the ultramafic body folded structure. The second group is pyroxene amphibolites comprising hornblende, plagioclase, orthopyroxene (En), clinopyroxene (Di) and accessories including opaque minerals, apatite, more rarely titanite and zircon. This group appears in the ultramafic country rock represented by garnet sillimanite gneisses. Whole rock chemical study was conducted with the objective to determine the protolith of amphibolites product of metamorphism. Two pyroxene amphibolites are classified as tholeiitic series and rare earth elements diagrams suggest that parental magma may be N-MORB setting. Also, non-pyroxene amphibolites could belong to an N-type MORB, with low contents of light rare earth elements, probably suggesting that their parental melt has originate from a depleted mantle.

Keywords: *amphibolite, metamorphism, geochemistry, La Cocha, Sierra Chica.*

INTRODUCCIÓN

En el cerro La Cocha, a dos kilómetros al sur del Observatorio Astronómico de Bosque Alegre, dentro del ámbito de la Sierra Chica de Córdoba, afloran varios cuerpos de anfibolitas que forman parte de la faja oriental de rocas máficas-ultramáficas (Kraemer *et al.*, 1995). Existen distintas interpretaciones en cuanto al origen de estas anfibolitas, las que están asociadas a gneises, mármoles y cuerpos ultramáficos. Basados en la asociación

de anfibolitas con mármoles, y teniendo en cuenta las diferencias petrográficas, se sugería un origen sedimentario (paranfibolitas; Gordillo y Lencinas 1979, Kull y Methol 1979) pero no se descartaba la posibilidad de que fueran sedimentos piroclásticos básicos (ortoanfibolitas). Trabajos más recientes buscaron establecer el origen de las anfibolitas basados en estudios geoquímicos (Mutti 1992, Mutti y Di Marco 1992, Pugliese 1995, Daziano 2004). Para las anfibolitas asociadas a los cuerpos ultramáficos, se proponen inter-

pretaciones donde estas probables rocas basálticas, ahora metamorfizadas a anfibolitas, representan corteza oceánica.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio petrológico y geoquímico con el objetivo de evaluar el protolito, luego metamorfizado, que dio origen a las anfibolitas de La Cocha y el ambiente tectónico de formación. Si bien el metamorfismo ha modificado la textura y mineralogía originales, se asume que la composición química global de las anfibolitas no habría sufrido una severa modifi-

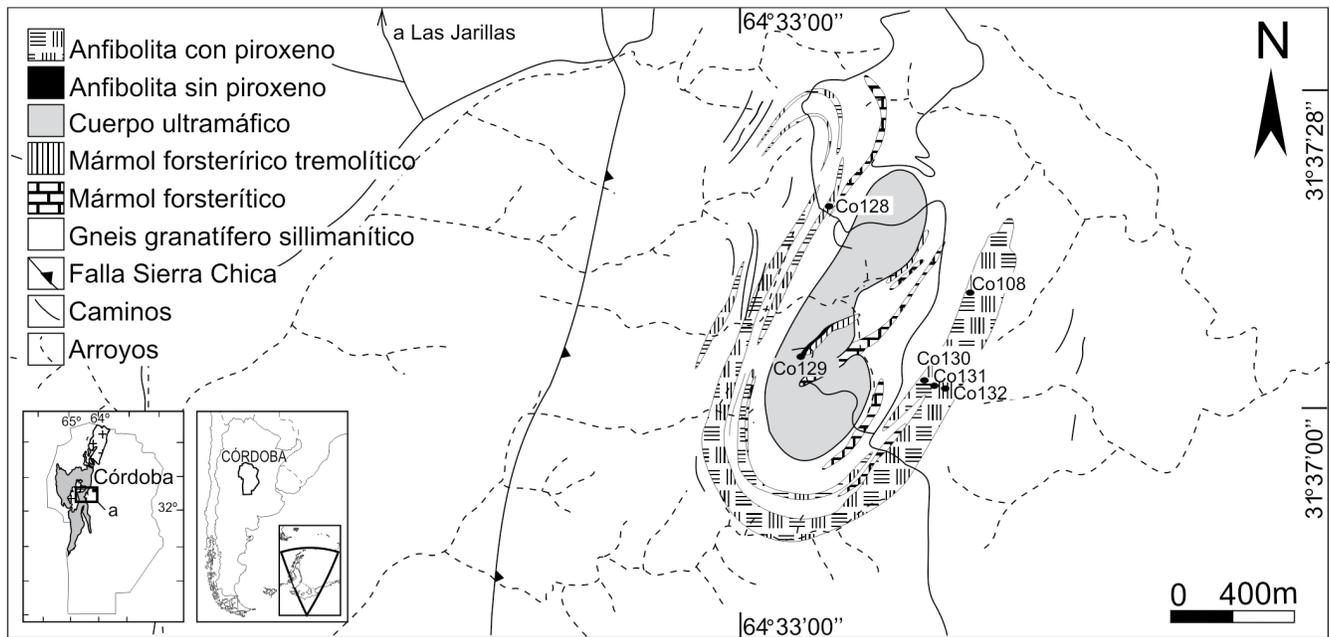


Figura 1: Mapa del área estudiada ubicada en la Sierra Chica de Córdoba, en el bloque alto, al sur del Observatorio Astronómico de Bosque Alegre.

cación, salvo los fluidos, por lo que se la puede utilizar en distintos diagramas que permiten discriminar protolitos y ambiente tectónico. Entre ellos, se destaca fundamentalmente el diagrama de tierras raras.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se realizó una fotointerpretación con fotografías aéreas a escala 1:25.000 de la región estudiada, delimitando las principales unidades litológicas que se muestran en la figura 1. Durante el reconocimiento de campo, se recolectaron 20 muestras de anfibolitas que se encuentran tanto en el contacto como intercaladas en el cuerpo ultramáfico de La Cocha.

Se confeccionaron 19 secciones delgadas de anfibolitas para el estudio petrográfico. Se seleccionaron 6 muestras para análisis químicos de roca total, ubicadas respecto al cuerpo ultramáfico de La Cocha en el flanco oeste, centro y flanco este. El muestreo se realizó en anfibolitas con dos piroxenos y sin piroxenos, evitando las alteraciones y venas. Se analizaron en los laboratorios de Actlabs en Canadá, los elementos mayoritarios por medio del método FUS-ICP (*Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry*) y los ele-

mentos traza con FUS-ICP y con ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*). Los datos se trataron gráficamente en diagramas de discriminación tectónica, en diagramas multielementos, de tierras raras normalizados y de elementos traza, y se analizaron relaciones entre algunos elementos propuestos por diferentes autores.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El área estudiada se encuentra en el cerro denominado La Cocha ($31^{\circ}36'40''\text{LS}$ - $64^{\circ}32'40''\text{LO}$, 1250 m s.n.m.), a 2 kilómetros hacia el sur del Observatorio Astronómico de Bosque Alegre en la Sierra Chica de Córdoba (Fig. 1). En este lugar, aflora un cuerpo ultramáfico con una extensión de 500 m de largo por 200 m de ancho, elongado hacia el noroeste. El encajonante está formado mayoritariamente por gneises granatíferos sillimaníticos y anfibolitas de dos piroxenos. Internamente al cuerpo ultramáfico, se reconocen una serie de bancos tabulares formados por mármoles forsteríticos y anfibolitas sin piroxeno. En conjunto, todas estas rocas conforman un pliegue reclinado de baja cilindridad, cuyos cierres podrían pertenecer a una estructura dómica tipo "a" asimilable a un pliegue en vaina ma-

yor, actualmente arrasado por la erosión (Anzil y Martino 2005). Presenta un eje inclinado con altos ángulos al norte ($\text{N } 20^{\circ}/68^{\circ}$) y plano axial con rumbo NNE buzante al este con alto ángulo ($\text{N } 10^{\circ}/85^{\circ}$ E; Anzil y Martino 2005, Anzil y Martino 2009). Además, tanto en el bloque alto como en el bloque bajo de la Sierra Chica a esta latitud, se reconocen varios cuerpos máficos-ultramáficos con las características generales apuntadas aquí, separados por la falla de la Sierra Chica. Todas las anfibolitas mencionadas forman parte de las denominadas anfibolitas de la Sierra Chica (Gordillo y Lencinas 1979)

Antecedentes

Las anfibolitas de las sierras Chicas fueron estudiadas por Gordillo y Lencinas (1979), quienes proponen que la íntima asociación de anfibolitas y mármoles sugiere un origen sedimentario, pero como la relación isotópica $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = 0,705 - 0,708$ de cuatro anfibolitas de Córdoba (Cingolani y Varela 1975) corresponden a rocas básicas, no descartan la posibilidad de que se trate de sedimentos piroclásticos básicos.

Kull y Methol (1979) establecieron mediante estudios petrográficos que las anfibolitas del área de Alta Gracia son muy

homogéneas, y por su composición mineralógica distinguieron dos grupos: parafibolitas y ortoanfibolitas. Las parafibolitas están constituidas por anfíbol, cuarzo, plagioclasa y titanita, la textura es granoblástica con esquistosidad marcada y siempre se encuentran ligadas a mármoles. Las ortoanfibolitas están constituidas por piroxeno o anfíbol, plagioclasa y titanita, la estructura puede presentar restos de estructura ígnea, están intercaladas con el gneis y son completamente independientes de los mármoles, lo que hizo suponer que se habían originado por metamorfismo de rocas ígneas.

Mutti y Di Marco (1992), en un trabajo más amplio, realizaron un estudio geoquímico de la tendencia de diferenciación continua entre la serpentinita y la anfibolita de las fajas ultramáficas del este y centro de las sierras de Córdoba, postulando que dicha asociación es de naturaleza cogenética y que se habría producido por diferenciación del manto superior mediante procesos de fusión. Mutti (1992) postula que este conjunto cogenético habría derivado de un magma empobrecido respecto al manto lherzólítico mediante un tren de diferenciación de un magma toleítico, descartando como posible fuente de origen a un manto anómalo o empobrecido. La unidad básica de este conjunto cogenético incluiría las anfibolitas de la Sierra Chica, productos del metamorfismo regional de esas rocas básicas. Dicha autora también aclara que un grupo de serpentinitas y anfibolitas espinelíferas poseen afinidad alcalina. También postuló que sus características transicionales permiten relacionarlas con ambientes de generación de arco de islas y/o cuencas de retro-arco. Posteriormente, Mutti *et al.* (2005 y bibliografía allí citada) interpretaron a las rocas ultramáficas - máficas expuestas en la Sierra Chica como integrantes de secuencias de rocas de la zona de transición entre la corteza y el manto.

Baldo (1992), desde un punto de vista también geoquímico, buscó establecer el origen y significado geológico de las anfibolitas del extremo norte de la Sierra Grande de Córdoba, proponiendo un origen ortoderivado. Específicamente, las

anfibolitas del complejo máfico-ultramáfico de La Cocha fueron estudiadas por Pugliese (1995), quien definió dos grupos de anfibolitas de acuerdo con las relaciones de campo, ya que desde el punto de vista geológico y petrológico el autor las encontró similares. El primer grupo fue definido como anfibolitas regionales exteriores al cuerpo ultramáfico y el segundo grupo las definió como anfibolitas foliadas que se encuentran en el interior del cuerpo ultramáfico.

En este trabajo, también hemos discriminado dos grupos de anfibolitas, como se dijo más arriba, las piroxénicas y las sin piroxeno, las que coinciden con las anfibolitas regionales exteriores y las anfibolitas foliadas, respectivamente, de Pugliese (1995). Se observa que ambos tipos de anfibolitas poseen una importante foliación metamórfica, bien marcada en el campo, que en el caso de las anfibolitas piroxénicas sirven para reconstituir el plegamiento mayor que se reconoce en el área (Anzil y Martino 2009).

PETROGRAFÍA

De acuerdo con las características mesoscópicas observadas en los afloramientos y en el estudio petrográfico, basados en la textura y en su composición mineralógica, se diferencian dos variedades de anfibolitas: (a) anfibolitas sin piroxeno y (b) anfibolitas con dos piroxenos (ortopiroxeno y clinopiroxeno).

En general, ambos tipos de anfibolitas se encuentran muy deformadas y se reconocen pliegues desde escalas megascópicas (Fig. 2a) a escalas del afloramiento, como se observa en el mapa (Fig. 1), y *boudinage* interno de anfibolita dentro de anfibolita, ambas con la misma composición mineralógica (Fig. 2b). Se reconocen también bandas de segregación leucocráticas, compuestas por plagioclasa y hornblenda de grano grueso, que cortan en diferentes direcciones a las anfibolitas.

Anfibolitas sin piroxeno

Las anfibolitas sin piroxeno se encuentran aflorando en el centro del cuerpo ultramáfico La Cocha, en contacto directo

con él y asociado a mármoles. Teniendo en cuenta que la estructura del cuerpo ultramáfico representa un sinforme (Anzil y Martino 2005), la presencia de anfibolitas y mármoles en el núcleo de esta geometría se interpretó como un acunamiento del encajonante. De acuerdo con esta interpretación de la estructura, tanto las anfibolitas con piroxenos y sin piroxeno, pertenecerían entonces al encajonante del cuerpo ultramáfico (Fig. 1), pero quedan claramente distinguidos por su mineralogía y yacencia.

La textura es granonematoblástica de grano medio (> 2 mm hasta 2 cm), de tamaño de grano mayor que el de las anfibolitas con piroxenos. Mineralógicamente, están compuestas por hornblenda y plagioclasa, con cantidades notables de titanita y minerales opacos.

La hornblenda es pleocroica, de color verde-azulada a parda, con ángulo de extinción de 15°, con formas prismáticas subidioblásticas a xenoblásticas. Puede presentar alteración a epidoto, el cual se desarrolla en el interior de los cristales en forma de grumos o como corona.

La plagioclasa aparece con forma redondeada a xenoblástica, maclada polisintéticamente y con zonación. Como productos de alteración se reconocen escapolita, sericita, caolín, epidoto y calcita, los cuales se disponen siguiendo los planos de macla o en los núcleos de la plagioclasa. Se observan rasgos de deformación tales como macclas flexionadas y acuñadas.

Como accesorios, se encuentran minerales opacos y titanita. Los primeros están en las fracturas de hornblenda o como granos individualizados que pueden estar oxidados. La titanita tiene forma ovalada a anhedra y es de color parda.

La composición química media de esta anfibolita es: SiO₂ 43,57%; Al₂O₃ 16,52%; Fe₂O₃(t) 13,17%; MgO 9,38% y CaO 11,76% (Cuadro 1).

Anfibolitas con piroxenos

Las anfibolitas con piroxenos aparecen como cuerpos tabulares de espesor variable, desde 10 m en el oeste del cuerpo ultramáfico a más de 100 m en el este. Son concordantes con la foliación de los gnei-

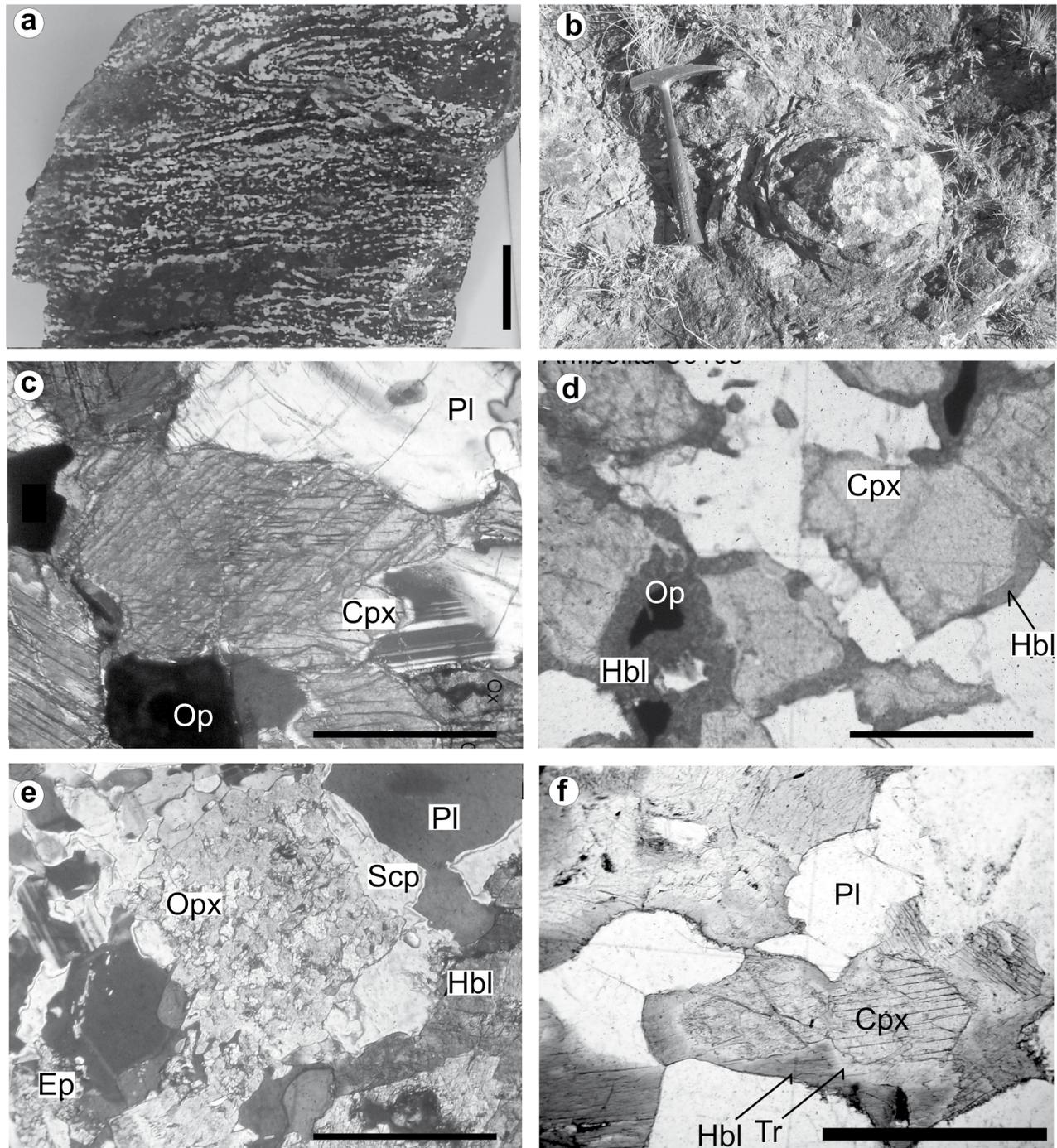


Figura 2: a) Anfibolita donde se observa el plegamiento del bandeo interno (escala=5 cm), b) *Boudin* de anfibolita. c) Fotomicrografía que muestra la composición mineral de las anfibolitas con dos piroxenos (barra de escala=0,5 mm). d) Fotomicrografía de clinopiroxeno con corona de anfíbol (barra de escala=0,5 mm). e) Fotomicrografía de clinopiroxeno con reemplazo de anfíbol a modo de parches, plagioclasa con reemplazo de escapolita (barra de escala=1 mm). f) Fotomicrografía de clinopiroxeno con corona de dos anfíboles (barra de escala=0,5 mm). Abreviaturas según Kretz (1983).

ses granatíferos sillimaníticos, que actúan como roca encajonante del conjunto anfibolitas más cuerpo ultramáfico. Las anfibolitas se encuentran envolviendo al cuerpo ultramáfico pero sin estar en contacto directo con él, separados por los gneises. Son rocas bandeadas, con bandas mili-

métricas alternantes de colores verde oscuro y claro. El bandeo se hace menos visible cuando se produce un aumento del tamaño de grano de la anfibolita. Las bandas de color verde oscuro tienen textura nematoblástica de grano fino y están compuestas por hornblenda y plagiocla-

sa. Las bandas de color verde claro tienen textura granoblástica de grano fino y están compuestas por piroxenos y plagioclasa. Microscópicamente se reconocen como minerales esenciales a hornblenda, plagioclasa, ortopiroxeno (En), clinopiroxeno (Di) y como accesorios minerales

CUADRO 1: Composición química de las anfibolitas de La Cocha.

| | FLW C0128 | Centro C0129 | FLE C0108 | FLE C0130 | FLE C0131 | FLE C0132 |
|------------------------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | 47,16 | 43,57 | 47,19 | 47,84 | 51,23 | 46,68 |
| Al ₂ O ₃ | 14,69 | 16,52 | 13,49 | 13,35 | 11,65 | 14,18 |
| Fe ₂ O ₃ (T) | 9,4 | 13,17 | 13,24 | 10,22 | 8,47 | 11,06 |
| MnO | 0,16 | 0,257 | 0,197 | 0,175 | 0,351 | 0,172 |
| MgO | 9,15 | 9,38 | 7,84 | 10,95 | 6,8 | 9,95 |
| CaO | 15,09 | 11,76 | 13,55 | 14,28 | 18,42 | 13,99 |
| Na ₂ O | 1,66 | 2,25 | 1,87 | 1,48 | 1,12 | 1,67 |
| K ₂ O | 0,38 | 0,44 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| TiO ₂ | 0,567 | 0,277 | 1,141 | 0,616 | 0,755 | 0,675 |
| P ₂ O ₅ | 0,06 | 0,02 | 0,15 | 0,05 | 0,13 | 0,06 |
| LOI | 1,53 | 1,93 | 0,86 | 0,85 | 0,84 | 1,26 |
| Total | 99,84 | 99,58 | 99,68 | 99,99 | 99,94 | 99,87 |
| Sc | 39 | 48 | 48 | 42 | 24 | 45 |
| V | 211 | 299 | 320 | 247 | 150 | 265 |
| Ba | 94 | 19 | 35 | 26 | 110 | 18 |
| Sr | 136 | 197 | 76 | 102 | 372 | 79 |
| Y | 16 | 9 | 25 | 17 | 34 | 18 |
| Zr | 32 | 3,5 | 49 | 26 | 134,7 | 25 |
| Cr | 360 | - | 310 | 400 | 70 | 400 |
| Co | 38 | 52 | 49 | 41 | 24 | 46 |
| Ni | 140 | 80 | 90 | 180 | 40 | 170 |
| Cu | 30 | 180 | 50 | 30 | 200 | 40 |
| Zn | 40 | 100 | 70 | 30 | 60 | 40 |
| Ga | 12 | 16 | 15 | 11 | 17 | 12 |
| Ge | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Rb | 9 | 9 | 2 | 6 | 5 | 2 |
| Nb | - | - | 7 | 1 | 11 | 1 |
| Sb | 5,9 | 9,1 | 3,6 | 5,7 | 5,5 | 5,2 |
| Cs | - | 1,1 | - | 4,8 | - | - |
| La | 1,7 | 0,2 | 4 | 1,5 | 27,8 | 1,2 |
| Ce | 4,5 | 0,6 | 11,4 | 4,4 | 70,1 | 4 |
| Pr | 0,72 | 0,11 | 1,84 | 0,78 | 9,56 | 0,74 |
| Nd | 3,9 | 0,8 | 9,3 | 4,4 | 36,8 | 4,4 |
| Sm | 1,3 | 0,4 | 2,9 | 1,4 | 7,7 | 1,6 |
| Eu | 0,57 | 0,31 | 1,01 | 0,6 | 1,54 | 0,65 |
| Gd | 2 | 0,8 | 3,9 | 2,4 | 7 | 2,4 |
| Tb | 0,4 | 0,2 | 0,7 | 0,4 | 1,2 | 0,5 |
| Dy | 2,7 | 1,3 | 4,5 | 3 | 6,5 | 3,2 |
| Ho | 0,6 | 0,3 | 1 | 0,7 | 1,3 | 0,7 |
| Er | 1,9 | 1,1 | 3 | 2,1 | 3,7 | 2,2 |
| Tm | 0,28 | 0,17 | 0,45 | 0,33 | 0,56 | 0,35 |
| Yb | 1,9 | 1,2 | 2,9 | 2,1 | 3,5 | 2,2 |
| Lu | 0,28 | 0,18 | 0,43 | 0,31 | 0,49 | 0,32 |
| Hf | 0,9 | - | 1,6 | 0,9 | 3,7 | 0,9 |
| Ta | - | - | 0,3 | - | 0,9 | - |
| Th | 0,3 | - | - | - | 6,4 | - |
| U | 0,1 | - | - | - | 1,5 | - |
| (La/Sm)n | 0,84 | 0,32 | 0,89 | 0,69 | 2,33 | 0,48 |

(*) Elementos mayoritarios: en porcentaje en peso (%), elementos trazas y tierras raras: en partes por millón (ppm). FLW: flanco oeste, FLE: flanco este.

opacos, apatita, escasa titanita, biotita y circón. Se reconocen venas de calcita que rellenan fracturas transgresivas al ban-

deado de las anfibolitas.

La hornblenda se encuentra orientada y es de color verde a parda, a diferencia de

las anfibolitas sin piroxeno donde la hornblenda tiene tonos azulados. Es subidio-blástica y a veces está alterada a calcita en el núcleo del grano y a clorita en los bordes. La hornblenda en contacto con plagioclasa y actinolita, presenta textura de reacción a modo de bordes dentados, y simplectitas con formas de vermes de plagioclasa. Tiene inclusiones de minerales opacos, con forma de bastones orientados en una dirección, que puede o no coincidir con la dirección general del bandeo de la roca.

La plagioclasa tiene formas xenoblásticas a redondeadas y está maclada polisintéticamente, con evidencias de deformación marcada por acuñamiento y flexión. Presenta inclusiones de hornblenda y plagioclasa. Se altera a caolín, epidoto, calcita y escapolita en los bordes.

El clinopiroxeno, identificado como diópsido, es de color verde pálido, con maclado polisintético (Fig. 2c) y textura tipo *schiller*. Las formas varían desde irregulares o amebiformes, hasta redondeadas o prismáticas. También presenta coronas o bordes de reacción y parches internos de actinolita, probablemente producidos por hidratación del diópsido. Suele ser común la presencia de calcita (Fig. 2d y e).

El ortopiroxeno, reconocido como ensatita, tiene formas xenoblásticas en general, con fuerte pleocroísmo de rosado a verde. También presenta textura *schiller*. En general, son de mayor tamaño que el resto de los minerales que componen estas anfibolitas. Producto de alteración, se tiñe de óxidos en las fracturas y bordes del mineral.

En ambos piroxenos se generan una serie de coronas de reacción formadas por dos capas. La primera está compuesta por tremolita-actinolita, en cristales prismáticos incoloros con aspecto pseudorradial, con presencia o no de minerales opacos, y en la segunda aparece hornblenda (Fig. 2f). Tales coronas se pueden formar por las siguientes reacciones propuestas por Mongkoltip y Ashworth (1986), donde el clinopiroxeno y el ortopiroxeno sufren reacciones de desestabilización dentro de las facies de anfibolitas y de esquistos verdes:

ortopiroxeno + agua = cummingtonita + (Mg,Fe)O,
 clinopiroxeno + (Mg,Fe)O + agua = tremolita/actinolita + CaO.

En condiciones de grado metamórfico medio, estos anfíboles generan hornblenda según las reacciones propuestas por Spear (1981):

cummingtonita + plagioclasa = hornblenda,

tremolita/actinolita + albita = hornblenda + oligoclasa.

Los minerales opacos (ilmenita) tienen forma redondeada y pueden tener una corona de titanita, como una textura retrorretrometamórfica característica (Bohlen y Liotta 1986, Gordillo y Lencinas 1979), seguida de una corona de hornblenda, o sólo una corona de esta última (Fig. 2d).

La composición química de las anfibolitas con piroxenos (Cuadro 1) presenta un promedio, de cinco muestras analizadas, de: SiO₂ 48,02%; Al₂O₃ 13,47%; Fe₂O₃(t) 10,48%; MgO 8,94% y CaO 15,07%.

GEOQUÍMICA DE LAS ANFIBOLITAS

Se realizaron análisis geoquímicos de roca total de 6 muestras de anfibolitas, una de ellas correspondiente a las anfibolitas sin piroxeno (muestra Co129) y el resto a las anfibolitas con dos piroxenos. Los análisis químicos de roca total se muestran en el cuadro 1.

Los elementos mayoritarios de las anfibolitas de La Cocha se representaron en diagramas para discriminar la serie magmática a la cual corresponden. Se utilizó el diagrama (Na₂O + K₂O) vs. SiO₂ (Fig. 3), donde las anfibolitas se ubican en el campo subcalino, excepto la muestra Co129 que corresponde en el campo alcalino. En general, las anfibolitas muestran una afinidad toleítica según el diagrama MgO-FeOt-(Na₂O + K₂O) de Irvine y Baragar (1971, Fig. 4) y el de FeOt-(FeOt/MgO) de Miyashiro (1974, Fig. 5); en este último, la muestra Co131 se ubica fuera del campo toleítico.

Los contenidos obtenidos en los análisis químicos varían entre 43,5 a 51,2% para SiO₂; de 0,17 a 0,44% para K₂O y

de 0,2 a 1,14% para TiO₂. Estos valores son similares a los propuestos por Miyashiro (1975) para rocas toleíticas abisales de un ambiente de dorsal mesoceánica (MORB). La relación FeOt/MgO da valores entre 1 y 1,56; excepto la muestra Co108 que da 1,87; esta relación puede ser un discriminante entre las rocas toleíticas abisales (MORB) para los valores menores a 1,7 y de toleitas de arcos de islas (IAB) o toleitas de fondo oceánico marginal, para valores mayores a 1,7. Otro discriminante para estos ambientes serían los contenidos de K₂O, pero como los álcalis son móviles ante procesos de metamorfismo y meteorización, no contarían como discriminante, mientras que los rangos de SiO₂ y FeOt/MgO son más estrechos.

Otra característica que se puede observar son las variaciones que presentan las anfibolitas en algunos elementos mayoritarios (Cuadro 1). Los valores de SiO₂ dan una media de 47%, con la muestra Co131 con el contenido más elevado (51%) y la muestra Co129 con el más bajo (43%). La muestra Co129 tiene los contenidos más elevados de Na₂O (2,25%) y K₂O (0,44%). En el caso del Cr, se encuentran en general contenidos mayores a 310 ppm, excepto la muestra Co131 que tiene 70 ppm y la muestra Co129 que presenta concentraciones debajo del límite de detección del instrumento de medición.

Se realizaron diagramas de correlación entre Zr (elemento incompatible por excelencia en los basaltos) y elementos mayoritarios y traza (Fig. 6), entre ellos los elementos de alto potencial iónico (HFSE) que presentan la propiedad de mantener constante la concentración ante los procesos de fusión parcial y cristalización fraccionada (Hofmann y Jochum 1996), y son inmóviles durante la alteración y metamorfismo (Pearce y Cann 1973, Hart *et al.* 1974, Winchester y Floyd 1976, Floyd y Winchester 1978, Morrison 1978, Humphris y Thompson 1978, Wood *et al.* 1979, Saunders *et al.* 1980, Pearce 1982, Pharaoh y Pearce 1984). Los diagramas de correlación de Zr frente a los HFSE (*High Field Strength Elements*, Y, Nb, Hf, P, La, Lu) muestran relaciones li-

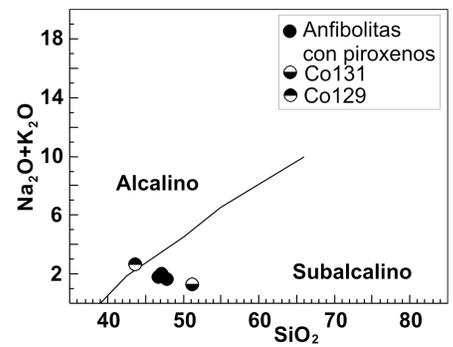


Figura 3: Diagrama SiO₂ vs. (Na₂O + K₂O) de Irvine y Baragar (1971). Símbolos: anfibolitas con piroxenos (círculo lleno); Co131 (círculo con relleno superior); Co129 (círculo con relleno inferior).

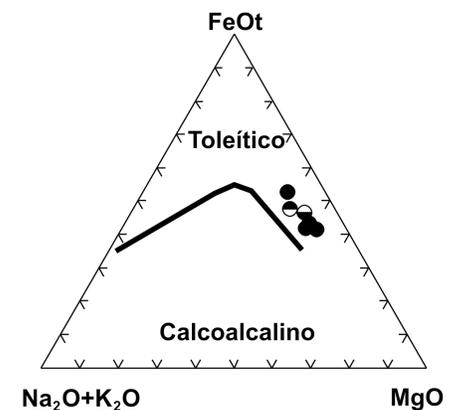


Figura 4: Diagrama MgO-FeOt-(Na₂O+K₂O) de Irvine y Baragar (1971). Símbolos como en la figura 1.

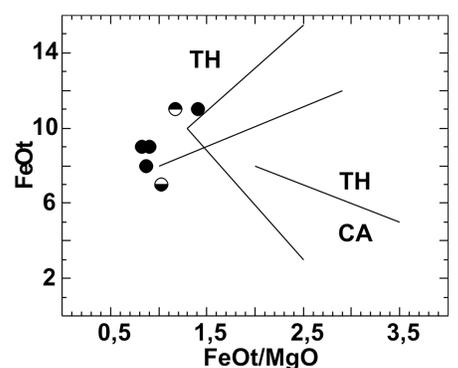


Figura 5: Diagrama FeOt-(FeOt/MgO) de Miyashiro (1974). Símbolos como en la figura 1. Referencias: toleítico (TH) y calcoalcino (CA).

neales, mientras que frente a los elementos litófilos de radio iónico grande (LILE: Rb, Sr, Ba) presentan dispersión, lo que podría indicar movilización de estos últimos durante alteración secundaria o procesos de metamorfismo (Smith

y Smith 1976, Dickin y Jones 1983, Dostal y Strong 1983, Merriman *et al.* 1986, Morata *et al.* 1997). Dentro de los elementos compatibles, el Ni y Cr tienen relaciones lineales, mientras que el V, Co y Cu se distribuyen como una nube. Las muestras Co131 ($Zr = 134,7$) y Co129 ($Zr = 3,5$) se alejan en general de estas relaciones.

Se utilizaron diagramas de discriminación tectónica, entre ellos Ti-V (Fig. 7) de Shervais (1982), Zr-TiO₂ (Fig. 8) y Zr-Sr/2-Ti/100 (Fig. 9) de Pearce y Cann (1973), para determinar el posible ambiente tectónico de los protolitos de las anfibolitas. Las rocas analizadas se ubican en el campo de las toleitas de arcos de islas (IA), salvo la muestra Co131 que corresponde a los campos de dorsal mesoceánica (MORB) o basaltos calcoalcalinos. La muestra Co129 se ubica en general fuera de los campos establecidos. Estos diagramas no dan evidencias concluyentes sobre el ambiente tectónico, aunque aportan una idea general (Vasconcelos-F *et al.* 2001, Shrivastava *et al.* 2004, Vermeesch 2006a), por lo que es conveniente recurrir a otros gráficos. Vermeesch (2006a) propone nuevos campos en los diagramas de discriminación de elementos incompatibles, determinados por análisis lineal en el triángulo Ti-V-Sc y por análisis cuadrático en el triángulo Ti-V-Sm. De acuerdo con estos últimos (Fig. 10), las anfibolitas de La Cocha se ubican en el campo de los basaltos de arcos de islas (IAB), mientras que las muestras Co131 y Co108 quedan representadas en el MORB.

Sun y Nesbitt (1978) discuten las regularidades geoquímicas y el significado genético de basaltos asociados con complejos ofiolíticos usando las relaciones entre Al₂O₃/TiO₂ y CaO/TiO₂ para establecer la génesis de basaltos con bajo y alto contenido de TiO₂, en una serie ofiolítica. Los autores proponen que incrementando los grados de fusión del manto puede producirse un progresivo aumento en las relaciones Al₂O₃/TiO₂ y CaO/TiO₂ en el fundido, pero a partir de un punto crítico estas relaciones no cambian. Esto se explica porque el Ti es incompatible, mientras que Al y Ca son compatibles. Si la cantidad de fundido aumenta, Al-Ca son

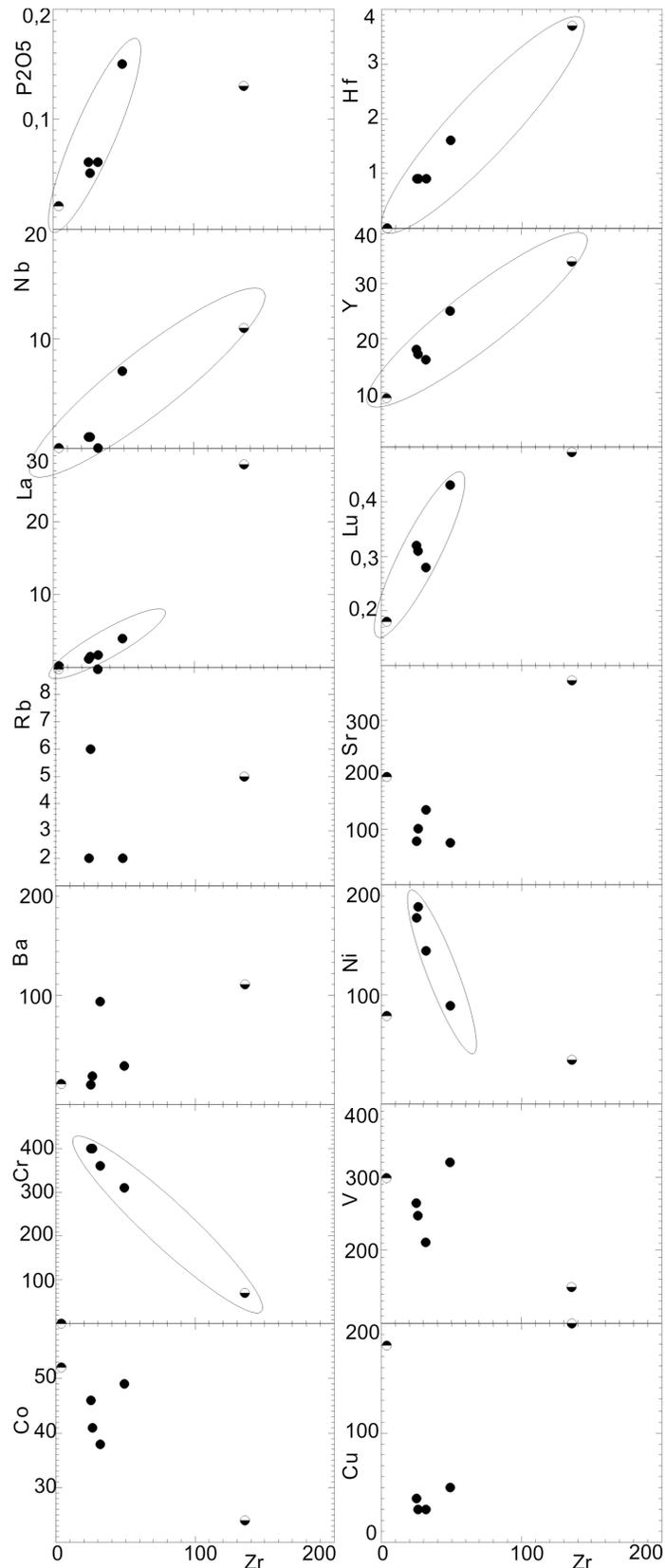


Figura 6: Diagramas de correlación entre Zr y P₂O₅, Hf, Nb, Y, La, Lu, Rb, Sr, Ba, Ni, Cr, V, Co y Cu. Símbolos como en la figura 1.

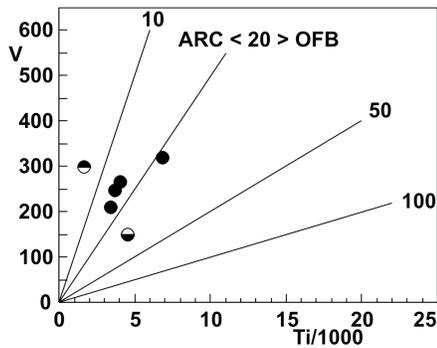


Figura 7: Diagramas de discriminación tectónica Ti - V de Shervais (1982). Símbolos como en la figura 1. Referencias: basaltos de arco (ARC) y basaltos de fondo oceánico (OFB).

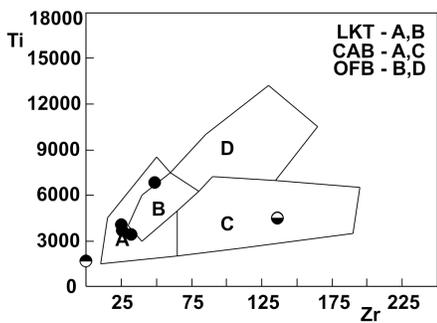


Figura 8: Diagramas de discriminación tectónica Zr - Ti de Pearce y Cann (1973). Símbolos como en la figura 1. Referencias: toleitas con bajo K (LKT); basaltos calcoalcalinos (CAB) y basaltos de fondo oceánico (OFB).

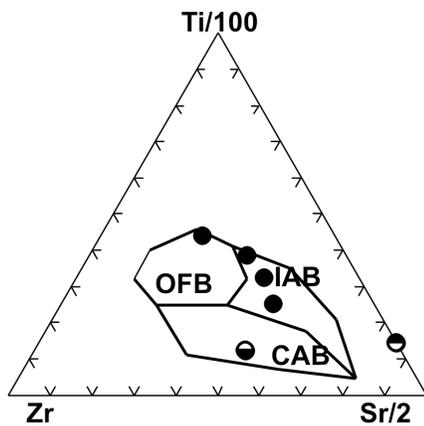


Figura 9: Diagramas de discriminación tectónica Zr-Sr-Ti/100 de Pearce y Cann (1973). Símbolos como en la figura 1. Referencias: basaltos de arco de islas (IAB); basaltos de fondo oceánico (OFB); basaltos calcoalcalinos (CAB).

retenidos en la fase de la fuente, y las relaciones Al_2O_3/TiO_2 y CaO/TiO_2 no aumentarán en el fundido resultante. Sobre

estas bases, Sun y Nesbitt (1978) proponen que los basaltos derivados de magmas tipo MORB tienen altos contenidos de Ti ($> 0,7\%$ TiO_2), mientras que los basaltos de arcos de islas y cuenca de interarco tienen bajos contenidos de Ti ($< 0,4\%$ TiO_2). Utilizando estos diagramas y los contenidos en TiO_2 , para las anfibolitas de La Cocha, se encuentra una afinidad con basaltos tipo MORB con alto Ti ($> 0,7\%$ TiO_2), mientras que la muestra Co129 tiene mayor afinidad con basaltos de arcos de islas o cuencas de interarco con bajo Ti ($> 0,4\%$ TiO_2 , Fig. 11). Esta última muestra, en los diagramas de correlación de TiO_2 con otros elementos (como Y, Ni y Co), presenta una dispersión en el TiO_2 con respecto al resto de las muestras analizadas.

Se utilizó el diagrama en árbol propuesto por Vermeesch (2006b) para discriminar entre basaltos no alterados de dorsal mesoceánica (MORB), de islas oceánicas (IOB) y de arcos de islas (IAB), donde intervienen TiO_2 , Sr, Ni, MgO y Rb. Las anfibolitas de La Cocha, según este diagrama, tienen afinidad tectónica de tipo MORB, salvo las muestras Co131 y Co129 que tienen afinidad con arcos de islas (IAB, Fig. 12). Este diagrama podría no ser representativo de un ambiente de generación para las anfibolitas, por la movilidad que pueden presentar los elementos que intervienen en la discriminación. Sin embargo, se lo usó para compararlo con el resto de los diagramas utilizados y donde también intervienen TiO_2 y Sr.

Los elementos traza también se utilizaron como discriminantes tectónicos, tomando como ejemplo los trabajos realizados por Saunders y Tarney (1984), quienes determinaron que la relación La/Ta con valores entre 18-20 indica una fuente dorsal mesoceánica empobrecida (N-MORB) y valores entre 10-14 una fuente de dorsal mesoceánica enriquecida (E-MORB) o de islas oceánicas (IOB). Para las anfibolitas de La Cocha, esta relación presenta valores entre 4 (Co132) y 13 (Co108), o sea, correspondientes al campo E-MORB o IOB. El resto de las muestras no dio valores para Ta, y la muestra Co131 da un valor excesivamente elevado de 30,9 (Cua-

dro 1). Otra relación que se usa como discriminante tectónico es la relación Zr/Nb , donde valores mayores a 30 serían de N-MORB y valores entre 4-15 de tipo E-MORB o IOB; para las anfibolitas de La Cocha, los valores oscilan entre 7 y 25, en el rango del E-MORB o IOB como en la relación anterior.

El diagrama multielemento (Fig. 13a) de las anfibolitas de La Cocha, normalizadas a condritas (Sun y McDonough, 1989), muestra un patrón cercano a la horizontal, con anomalías negativas en Nb y P. Las muestras Co131 y Co129 muestran irregularidades en el patrón, donde Co131 presenta los contenidos más elevados, anomalías positivas en Th, Ce y Sm, y negativas en K, P y Ti. La muestra Co129 tiene los contenidos más bajos y un patrón incompleto.

Los diagramas de tierras raras normalizadas a condrita (Fig. 13b; Sun y McDonough 1989) muestran patrones horizontales, con escaso fraccionamiento de las tierras raras y con valores cercanos a 10, sin anomalía de Eu. La relación $(La/Yb)_n$ da valores menores a 1, lo que correspondería comúnmente al campo N-MORB. Los valores de Yb normalizado dan valores mayores a 10 lo que indicaría que no hay granate como fase residual en la fuente. El patrón relativamente plano de tierras raras pesadas es consistente con la presencia de cantidades significativas de clinopiroxeno (Berger *et al.* 2001). Se estableció una comparación de los valores obtenidos para La Cocha con los valores medios de N-MORB propuestos por Hofmann (1988) y por Sun y McDonough (1989), donde se observa que siguen el mismo patrón. Los basaltos de arcos de islas también presentan patrones horizontales, pero con un pequeño enriquecimiento en las tierras raras livianas y valores absolutos mayores a 10 que en La Cocha no se observan.

La muestra Co131 presenta un patrón que difiere del resto de las anfibolitas con dos piroxenos, con contenidos de tierras raras más elevados y anomalía negativa de Eu [$Eu/Eu^* = 0,64$; calculado como $Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)}$]. Muestra un enriquecimiento en las tierras raras livia-

nas, donde la relación $(La/Yb)_n$ da un valor de 5,7.

Se observa que el comportamiento de la anfibolita sin piroxeno Co129 es diferente, ya que tiene un fuerte fraccionamiento entre las tierras raras livianas y pesadas; las livianas están empobrecidas, con una relación $(La/Yb)_n$ menor a 1 que sigue un patrón similar a N-MORB y tiene anomalía positiva de Eu ($Eu/Eu^* = 1,67$). Es la única muestra que presenta un valor menor a 10 del Yb normalizado a condritas (Sun y McDonough 1989), lo que indicaría la presencia de granate en la fase residual de la fuente.

INTERPRETACIÓN

Las mayoría de las muestras analizadas geoquímicamente son anfibolitas de dos piroxenos y se encuentran dentro del encajonante metamórfico del cuerpo ultramáfico serpentinizado de La Cocha. Una de las muestras corresponde al grupo de anfibolitas sin piroxeno (Co129) y se encuentra en el interior del cuerpo ultramáfico.

Según el comportamiento geoquímico de estas rocas, se pueden observar diferencias entre estos dos tipos de anfibolitas. La muestra analizada de las anfibolitas sin piroxeno presenta minerales de sulfuro y tiene un tamaño de grano mayor al resto. A su vez, la muestra Co131 correspondiente a las anfibolitas con piroxenos, también presenta minerales de sulfuro, asociado a un comportamiento geoquímico diferente al resto de las anfibolitas, que estarían referidos a una alteración o contaminación cortical que habría movilizó a los elementos químicos de manera diferente al resto de las muestras analizadas.

La anfibolita sin piroxeno, muestra Co129, difiere en valores absolutos de los elementos analizados, respecto a las anfibolitas con piroxenos. Esta muestra se ubica en el campo alcalino y los altos contenidos de álcalis podrían estar reflejando efectos de metamorfismo hidrotermal (Brogiolini y Ribot 1994). Además, queda fuera de los campos establecidos en los diagramas de discriminación tectónica, lo que sugie-

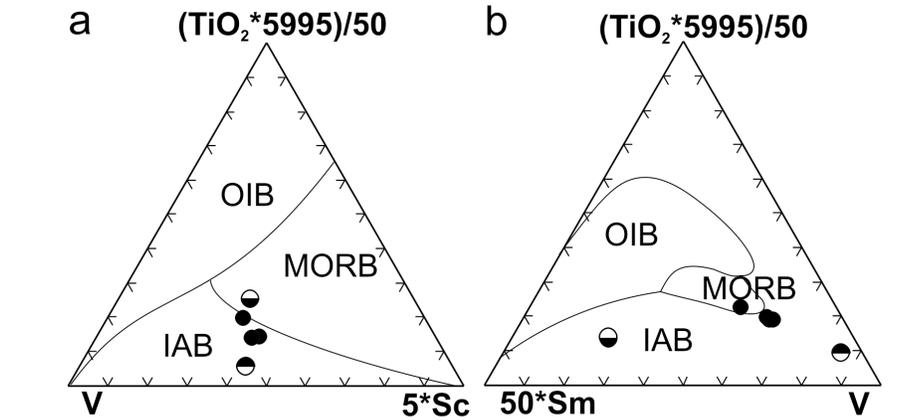


Figura 10: Diagramas de discriminación (a) lineal Ti-V-Sc y (b) cuadrática Ti-V-Sm con los campos establecidos por Vermeesch (2006a). Símbolos como en la figura 1. Referencias: basaltos de islas oceánicas (OIB); basaltos de dorsales mesoocéánicas (MORB); basaltos de arcos de islas (IAB).

re tener reservas en el uso de estos diagramas. Según el diagrama de tierras raras normalizadas a condritas (Sun y McDonough 1989) presenta características típicas de un ambiente tipo N-MORB. A diferencia de las anfibolitas con dos piroxenos, esta muestra presenta mayor fraccionamiento entre las tierras raras livianas y pesadas, deprimida en los elementos livianos, indicando que el magma se formó a partir de la fusión parcial de un manto empobrecido en elementos livianos.

Las anfibolitas con piroxenos, basados en el análisis geoquímico, se encuentran dentro de la serie subalcalina y en el campo toleítico (excepto Co131). Más específicamente, corresponderían a rocas toleíticas abisales. En los diagramas de discriminación tectónica utilizados, donde intervienen en general Ti, V, Zr, Sr, Sc y Sm, las anfibolitas analizadas se ubican en el campo de las toleíticas de arcos de islas o en el campo MORB. Utilizando los diagramas Al_2O_3/TiO_2 y CaO/TiO_2 y los contenidos en TiO_2 , se encuentra una afinidad con basaltos tipo MORB de alto Ti ($> 0,7\% TiO_2$). Las relaciones entre elementos trazas, La/Ta y Zr/Nb se utilizaron como discriminantes tectónicos, dando valores correspondientes al campo E-MORB o IOB. Esta variedad de ambientes determinados para los protolitos de las anfibolitas podría deberse a la movilidad que presentan algunos de los elementos que intervienen, como se observa en los diagramas de correlación con respecto al Zr (Fig. 6).

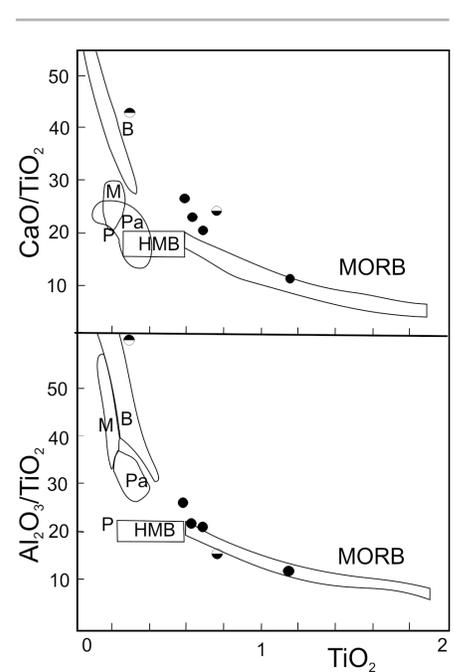


Figura 11: Diagrama de relaciones entre Al_2O_3/TiO_2 y CaO/TiO_2 para establecer la génesis de basaltos con bajo TiO_2 (modificado de Sun y Nesbitt, 1978). Símbolos como en la figura 1. Referencias: basaltos con alto Mg (HMB); basaltos de dorsales mesoocéánicas (MORB); Papua (Pa); fosa Mariana (M); Pa y M son basaltos de arcos de islas); Betts Cove (B); basalto ofiolítico); modelo de piroclita (P).

Para precisar mejor entre la variedad de ambientes determinados, se utiliza el diagrama de tierras raras (Fig.13b), elementos que presentan una buena relación con el Zr (Fig. 6). Según este diagrama, las anfibolitas con dos piroxenos se habrían formado en un ambiente de N-MORB. Las diferencias observadas en el

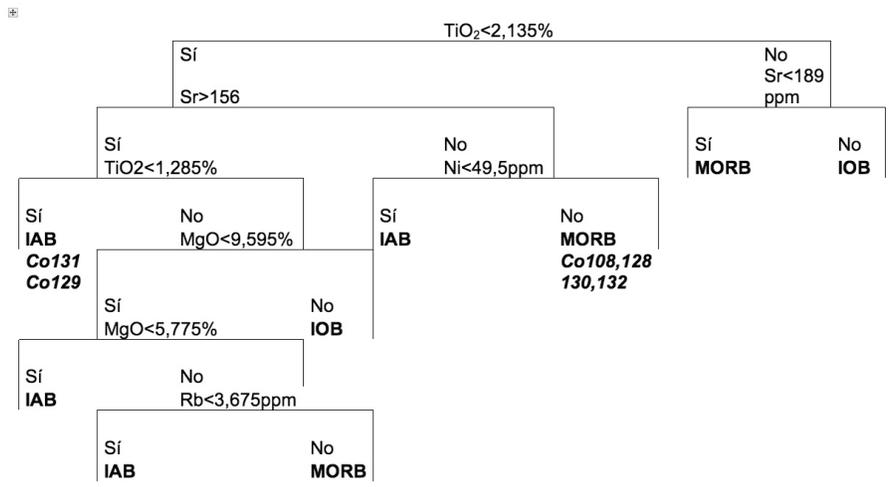


Figura 12: Diagrama en árbol de elementos mayoritarios y traza, propuestos por Vermeesch (2006b), para discriminar entre basaltos de dorsales mesoceánicas (MORB), de islas oceánicas (IOB) y de arcos de islas (IAB).

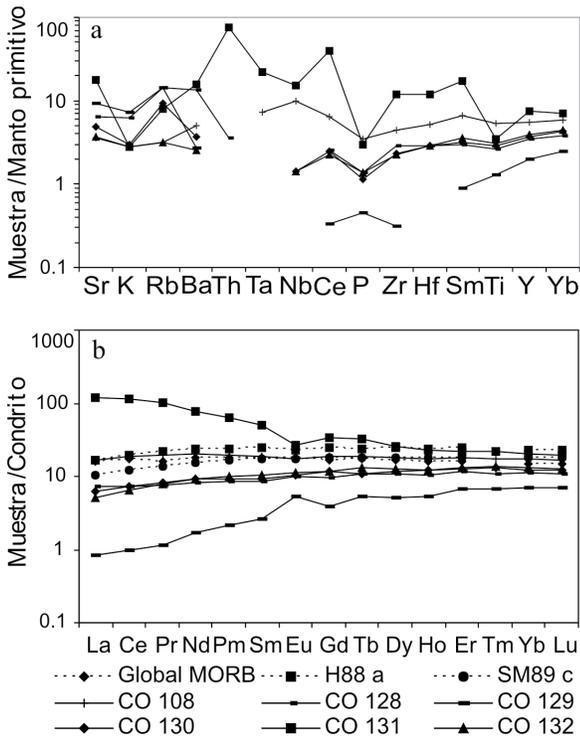


Figura 13: Diagramas: a) Multielementos normalizado a manto primitivo (Sun y McDonough 1989). b) Tierras raras normalizado a condritas (Sun y McDonough 1989). Referencias: N-MORB de Hofmann (1988; H88a); N-MORB de Sun y McDonough (1989; SM89c); datos de Basaltic Volcanism Study Project (1981; Global MORB).

patrón de la muestra Co131 se atribuyen a la influencia de componentes con características corticales, por los elevados valores de tierras raras livianas respecto a las condritas, la anomalía negativa de Eu y el fuerte fraccionamiento de las tierras raras livianas respecto de las pesadas.

CONCLUSIONES

Según las características de yacencia, tex-

turas y mineralogía, se diferencian dos tipos de anfibolitas en el área del cerro La Cocha: sin piroxeno y con piroxenos, ambas con foliación metamórfica bien marcada.

La anfibolita sin piroxeno aflora en contacto con el cuerpo ultramáfico, tiene textura granonematoblástica de grano medio, está compuesta por hornblenda, plagioclasa, titanita y minerales opacos, y contiene minerales de sulfuro. Geoquí-

micamente presenta contenidos de SiO₂ más bajos (43%), los valores más elevados de Na₂O (2,25%) y K₂O (0,44%), y el contenido en Cr queda debajo del límite de detección del análisis. El bajo contenido en SiO₂ no reflejaría un protolito de un magma ígneo y en base a los diagramas de discriminación, no se pudo definir claramente el ambiente tectónico de generación. De acuerdo con el patrón determinado para el diagrama de tierras raras normalizadas a condritas, se podría asignar un ambiente N-MORB.

La anfibolita con piroxenos (ortopiroxeno y clinopiroxeno) se encuentra en el encajonante del cuerpo ultramáfico de La Cocha, asociada a gneises granatíferos sillimaníticos. Presenta textura bandeada de grano fino y está compuesta por hornblenda, plagioclasa, ortopiroxeno (En), clinopiroxeno (Di), minerales opacos, apatita, titanita y circón. Geoquímicamente se la clasifica dentro de la serie subalcalina toléitica. Basados en los diagramas y contenidos establecidos para diferenciar los ambientes tectónicos, se observan características correspondientes a IAB o a MORB, pero se precisó el ambiente de tipo N-MORB, de acuerdo con el patrón de tierras raras normalizadas a condritas. Dentro de este grupo de rocas, la muestra Co131, tiene un comportamiento que se desvía del resto, lo que se interpretó como producto de contaminación cortical, evidenciado en el comportamiento de los elementos mayoritarios, trazas y tierras raras. Las características geoquímicas de estas anfibolitas permitirían asignarles un origen de N-MORB, que implicaría la formación de la roca en corteza oceánica, ahora exhumada en la Sierra Chica y aflorando en íntima asociación a rocas ultramáficas, mármoles y gneises.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del trabajo de tesis doctoral de P. Anzil para el Doctorado en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y también de las tareas de adscripción a la Cátedra de Geología Tectónica

de dicha facultad. Los autores agradecen las sugerencias y comentarios de los árbitros, el Dr. Otamendi y anónimo. Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNC por el apoyo en las tareas de campo y a FONCYT (PICT R-179) por solventar el costo de los análisis químicos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Anzil, P.A., y Martino, R.D. 2005. Estructura del cuerpo ultramáfico de La Cocha, Sierra Chica de Córdoba, Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 53-58, La Plata.
- Anzil, P.A., y Martino, R.D. 2009 The megascopic and mesoscopic structure of La Cocha ultramafic body, Sierra Chica of Córdoba, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 28: 398-406.
- Basaltic Volcanism Study Project 1981. Ocean-floor basaltic volcanism. Basaltic volcanism on the terrestrial planets, 132-160. Pergamon Press, New York.
- Baldo, E.G.A. 1992. Estructura, petrología y geoquímica de las rocas ígneas y metamórficas entre la Pampa de Olaen y Characato, extremo norte de la Sierra Grande de Córdoba. República Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 305 p., Córdoba
- Berger, S., Cochrane, D., Simons, K., Savov, I., Ryan, J.G. y Peterson, V.L. 2001. Insights from rare earth elements into the genesis of the Buck Creek Complex, Clay County, NC. *Southeastern Geology* 40: 201-212.
- Bohlen, S.R. y Liotta, J.J. 1986. A barometer for garnet amphibolites and garnet granulites. *Journal of Petrology* 27: 1025-1034.
- Brogioni, N. y Ribot, A. 1994. Petrología de los cuerpos La Melada y La Gruta, faja máfica-ultramáfica del borde oriental de la Sierra de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 49: 269-283.
- Cingolani, C.A. y Varela, R. 1975. Geocronología Rubidio-Estroncio de rocas ígneas y metamórficas de las Sierras Chicas y Grandes de Córdoba. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 9-35, Buenos Aires.
- Daziano, C.O. 2004. Las anfibolitas de la Sierra Chica de Córdoba, Argentina. Publicaciones de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), 132 p., Córdoba.
- Dickin, A.P. y Jones, W.W. 1983. Relative elemental mobility during hydrothermal alteration of a basic sill, Isle of Skye, N.W. Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 82: 147-153.
- Dostal, J. y Strong, D.F. 1983. Trace-element mobility during low-grade metamorphism and silicification of basaltic rocks from Saint John, New Brunswick. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20: 431-435.
- Floyd, P.A. y Winchester, J.A. 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology* 21: 291-306.
- Gordillo, C. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Turner, J.C. (ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias: 577-650, Córdoba.
- Hart, S.R., Erlank, A.J. y Kable, E.J. 1974. Sea floor basalt alteration: Some chemical and Sr isotope effects. *Contributions to mineralogy and Petrology* 44: 219-240.
- Hofmann, A.W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90: 297-314.
- Hofmann, A.W. y Jochum, K.P. 1996. Source characteristics derived from very incompatible trace elements in Mauna Loa and Mauna Kea basalts, Hawaii scientific drilling project. *Journal of Geophysical Research* 101: 11831-11839.
- Humphris, S.E. y Thompson, G. 1978. Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 127-136.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Kraemer, P., Escayola, M.P. y Martino, R.D. 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40' 32°40'), Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50: 47-59.
- Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- Kull, V. y Methol, E. 1979. Descripción geológica de la hoja 21i, Alta Gracia, provincia de Córdoba. Servicio Geológico Nacional, 54 p., Buenos Aires.
- Merriman, R.J., Bevins, R.E. y Ball, T.K. 1986. Petrological and geochemical variations within the Tal y Fan intrusion: a study of element mobility during low-grade metamorphism with implications for petrotectonic modelling. *Journal of Petrology* 27: 1409-1436.
- Miyashiro, A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology* 83: 249-281.
- Mongkoltip, P. y Ashworth, J.R. 1986. Amphibolitization of metagabbros in the Scottish Highlands. *Journal of Metamorphic Geology* 4: 261-283.
- Morata, D., Puga, E., Demant, A. y Aguirre, L. 1997. Geochemistry and tectonic setting of the "Ophites" from the external zones of the Betic Cordilleras (S. Spain). *Estudios Geológicos* 53: 107-120.
- Morrison, M.A. 1978. The use of "immobile" trace elements to distinguish the paleotectonic affinities of metabasalts: Applications to the Paleocene basalts of Mull and Skye, Northwest Scotland. *Earth and Planetary Science Letters* 39: 407-416.
- Mutti, D.I. 1992. Las rocas ultrabásicas-básicas de la provincia de Córdoba: interpretaciones geoquímicas e implicancias geotectónicas. 1° Reunión de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas, Actas 2: 411-432, La Plata.
- Mutti, D.I. y Di Marco, A. 1992. Asociación serpentinita-anfibolita: unidades cogenéticas dominantes de las fajas ultrabásicas oriental y central, Córdoba, Argentina. 1° Reunión de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas, Actas 2: 433-448, La Plata.
- Mutti, D.I., Di Marco, A., Tourn, S., Geuna, S., Caccaglio, O. y González Chiozza, S. 2005. Evolución metalogénica de las Sierras Pampeanas de Córdoba y sur de Santiago del Estero: Ciclos prepampeano y pampeano. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 104-121.
- Pearce, J.A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. En Thorpe, R.S. (eds.) *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, 525-548. John Wiley y Sons, London.
- Pearce, J.A. y Cann, J.R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letter* 19: 290-300.
- Pharaoh, T.C. y Pearce, J.A. 1984. Geochemical evidence for the geotectonic setting of early Proterozoic metavolcanic sequences in Lapland. *Precambrian Research* 25: 283-308.

- Pugliese, L. 1995. Geoquímica y petrogénesis del complejo máfico-ultramáfico estratificado del Cerro La Cocha de Bosque Alegre, en la Sierra Chica de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 393 p., Córdoba.
- Saunders, A. y Tarney, J. 1984. Geochemical characteristics of basaltic volcanism within back-arc basins. En Kokelaar, B. y Howels, M (eds.) *Marginal Basin Geology*, The Geological Society, Blackwell Scientific Publications, 59-76.
- Saunders, A.D., Tarney, J., Marsh, N.G y Wood, D.A. 1980. Ophiolites as ocean crust or marginal basin crust: a geochemical approach. En Panayiotou, A. (Ed.) *Ophiolites*, Proceedings of the International Ophiolite Symposium, 193-204, Cyprus.
- Shervais, J.W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planet Science Letters* 59: 101-118.
- Shrivastava, R.K, Chandra, R. y Shastry, A. 2004. High-Ti type N-MORB parentage of basalts from the south Andaman ophiolite suite, India. *Proceeding of Indian Academic Science. Earth and Planetary Science* 113: 605-618.
- Smith, R E. y Smith, S.E. 1976. Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Nb in classification of basaltic magmas. *Earth and Planetary Science* 32: 114-120.
- Spear, F.S. 1981. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *American Journal of Science* 281: 697-734.
- Sun, S. y McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En Saunders, A.D. y Norry, M.J. (eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society 313-345, London.
- Sun, S.S. y Nesbitt, R.W. 1978. Geochemical regularities and genetic significance of ophiolitic basalts. *Geology* 11: 689-693.
- Vasconcelos-F, M., Verma, S.P. y Vargas-B, R.C. 2001. Diagrama Ti-V: una nueva propuesta de discriminación para magmas básicos en cinco ambientes tectónicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18: 162-174.
- Vermeesch, P. 2006a. Tectonic discrimination diagrams revisited: *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems* 7, Q06017, doi:10.1029/2005GC001092.
- Vermeesch, P. 2006b. Tectonic discrimination of basalts with classification trees: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1839-1848.
- Winchester, J.A. y Floyd, P.A. 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 28: 459-469.
- Wood, D.A., Jordon, J.L. y Treuil, M. 1979. A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letter* 45: 326-336.

Recibido: 20 de octubre, 2011.

Aceptado: 3 de mayo, 2012.