

# Petrografía, geoquímica y estratigrafía ígnea del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, sierra Grande de San Luis, Argentina

Francisco E. CACACE<sup>1</sup>, Gabriela R. FERRACUTTI<sup>1</sup>, Theodoros NTAFLLOS<sup>2</sup>, Lucía ASIAIN<sup>1</sup> y Ernesto A. BJERG<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico del Sur (INGEOSUR, UNS-CONICET), Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur - Bahía Blanca. Email: gferrac@uns.edu.ar

<sup>2</sup>Faculty of Earth Sciences, Geography and Astronomy, Department of Lithospheric Research, University of Vienna, Viena.

## RESUMEN

Escuela Las Pircas es un cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico situado en el sector sur de la faja de rocas máficas-ultramáficas La Jovita-Las Águilas, la cual se extiende aproximadamente 100 km con rumbo NNE, con un ancho que oscila entre 3 y 5 km, y se halla emplazada en el faldeo oriental de la sierra Grande de San Luis. Los cuerpos máficos-ultramáficos que constituyen esta faja son de gran interés por ser intrusiones de tipo estratificadas portadoras de una mineralización de sulfuros de Fe-Ni-Cu-Co y minerales del grupo del platino. Las variaciones modales y geoquímicas exhibidas por el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, permiten definir en éste cuatro unidades estratigráficas: unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa, unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, unidad norítica hornblendífera inferior y unidad norítica hornblendífera superior. Estas unidades constituyen una secuencia de niveles máficos y ultramáficos intercalados, los cuales conforman la porción superior de la serie estratificada. Los resultados de los análisis de química de roca total y mineral permitieron establecer que todas las unidades definidas corresponderían a una misma secuencia magmática, en la cual las diferencias mineralógicas y geoquímicas entre las distintas unidades habrían sido controladas principalmente por variaciones en las tasas de nucleación y crecimiento cristalino. Asimismo, los resultados de los análisis petrográficos y químicos permitieron inferir que las unidades definidas en el cuerpo intrusivo Escuelas Las Pircas y las correspondientes a la Serie Estratificada del cuerpo intrusivo Viorco corresponderían a una misma secuencia estratigráfica ígnea, donde las unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas representan el mayor grado de evolución.

**Palabras clave:** Rocas máficas-ultramáficas, serie estratificada, estratificación magmática, Sierras Pampeanas.

## ABSTRACT

*Petrography, geochemistry and igneous stratigraphy of the Escuela Las Pircas intrusion, Sierra Grande de San Luis, Argentina.*

Escuela Las Pircas is a mafic-ultramafic intrusion located in the southern sector of La Jovita-Las Águilas mafic-ultramafic belt, which is a 3 to 5 km wide and 100 km long NNE trending belt located along the Eastern slope of the Sierra Grande de San Luis. The mafic-ultramafic bodies of this belt are of great interest since they are layered intrusions which carry an associated mineralization of Fe-Ni-Cu-Co sulfides and platinum group minerals. Modal and cryptic layering identified in Escuela Las Pircas intrusion allows the definition of four stratigraphic units: Plagioclase-bearing pyroxene hornblendite unit, plagioclase-bearing hornblende orthopyroxenite unit, lower hornblende norite unit and upper hornblende norite unit. Their petrographic features would suggest their belonging to the upper portion of the layered series. Bulk-rock and mineral chemistry results indicated that all the units of Escuela Las Pircas intrusion correspond to the same magmatic sequence, in which mineralogical and geochemical differences would have been mainly controlled by nucleation and crystal growth rate variations. Furthermore, petrographic and chemistry analysis indicate that the units defined in Escuela Las Pircas and in those from Viorco Layered Series respond to the same stratigraphic igneous sequence, being Escuela Las Pircas units those that represent the higher degree of evolution.

**Keywords:** Mafic-ultramafic rocks, layered series, magmatic stratification, Sierras Pampeanas.

## INTRODUCCIÓN

El cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas se localiza 6 km al NO de la localidad de Trapiche en la provincia de San Luis. Sus afloramientos se extienden aproximadamente 2,4 km en dirección NNE y menos de un kilómetro en dirección ONO. Este cuerpo, junto con las intrusiones máficas-ultramáficas Las Águilas, Las Higueras, El Renegado, Virorco y El Fierro, constituyen el sector sur de la faja de rocas máficas-ultramáficas La Jovita-Las Águilas (Pastore y Ruiz Huidobro 1952, González Bonorino 1961, Gordillo y Lencinas 1979, Kilmurray y Villar 1981, Mallimacci 1985) la cual se encuentra emplazada en el faldeo oriental de la sierra Grande de San Luis, en la unidad morfoestructural de las Sierras Pampeanas, y presenta una extensión aproximada de 100 km en dirección NNE, y un ancho que oscila entre 3 y 5 km en dirección ONO (Fig. 1).

Los cuerpos máficos-ultramáficos de la zona de estudio son de gran interés debido a que son intrusiones de tipo estratificadas (Hauzenberger *et al.* 1997a, Mogessie *et al.* 2000, Ferracutti *et al.* 2006) tales como aquéllas de relevancia mundial como Skaergaard (Groenlandia), Kabanga (Tanzania), Jinchuan (China), Bjerkreim-Sokndal (Noruega), entre otros. El estudio de este tipo de intrusiones es de importancia dado que las mismas son portadoras de numerosas mineralizaciones, que en la faja La Jovita-Las Águilas están representadas por sulfuros de hierro-níquel-cobre-cobalto (Fe-Ni-Cu-Co) y minerales del grupo del platino (MGP). Ramos (1988), Brogioni (1994) y Steenken *et al.* (2008) indicaron que los cuerpos máficos-ultramáficos de la zona de estudio estarían vinculados a un ambiente tectónico de retroarco. Asimismo, Brogioni (2001), Ferracutti (2005), Ferracutti *et al.* (2013, 2017) y Cacace *et al.* (2016) sugieren que estos cuerpos intrusivos corresponden a una misma secuencia magmática, la cual habría evolucionado por cristalización fraccionada, a partir de un magma de afinidad toleítica. Por otra parte, Ferracutti *et al.* (2013) determinaron, en base a la química de roca total, la concentración de metales base y elementos del grupo del platino, y a rasgos

texturales, que estos cuerpos máficos-ultramáficos serían comparables con otros desarrollados en regímenes de tectónica extensional, tales como Jinchuan (Tang 1993) y Kabanga (Evans *et al.* 2000).

En lo que respecta a la edad de los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos aflorantes en la zona de estudio, Sims *et al.* (1998) obtuvieron una edad U-Pb SHRIMP en circón de  $478 \pm 6$  Ma (Ordovícico Temprano) a partir de una segregación ácida en una piroxenita perteneciente al cuerpo intrusivo Las Águilas. Más recientemente, Ferracutti *et al.* (2017), reportaron una edad  $1002 \pm 150$  Ma (Esténico), basada en una isócrona Sm-Nd en roca total, confeccionada a partir de muestras provenientes de las diferentes intrusiones del sector sur de la faja.

Este trabajo tiene por objetivo definir la estratigrafía ígnea del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas. Dado que a excepción de los trabajos realizados por Ferracutti *et al.* (2011, 2017) no existen otros trabajos que contemplen el estudio estratigráfico de los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos que componen la faja La Jovita-Las Águilas, esta contribución profundiza el conocimiento y mejora la caracterización de los cuerpos máficos-ultramáficos de la sierra Grande de San Luis.

## MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

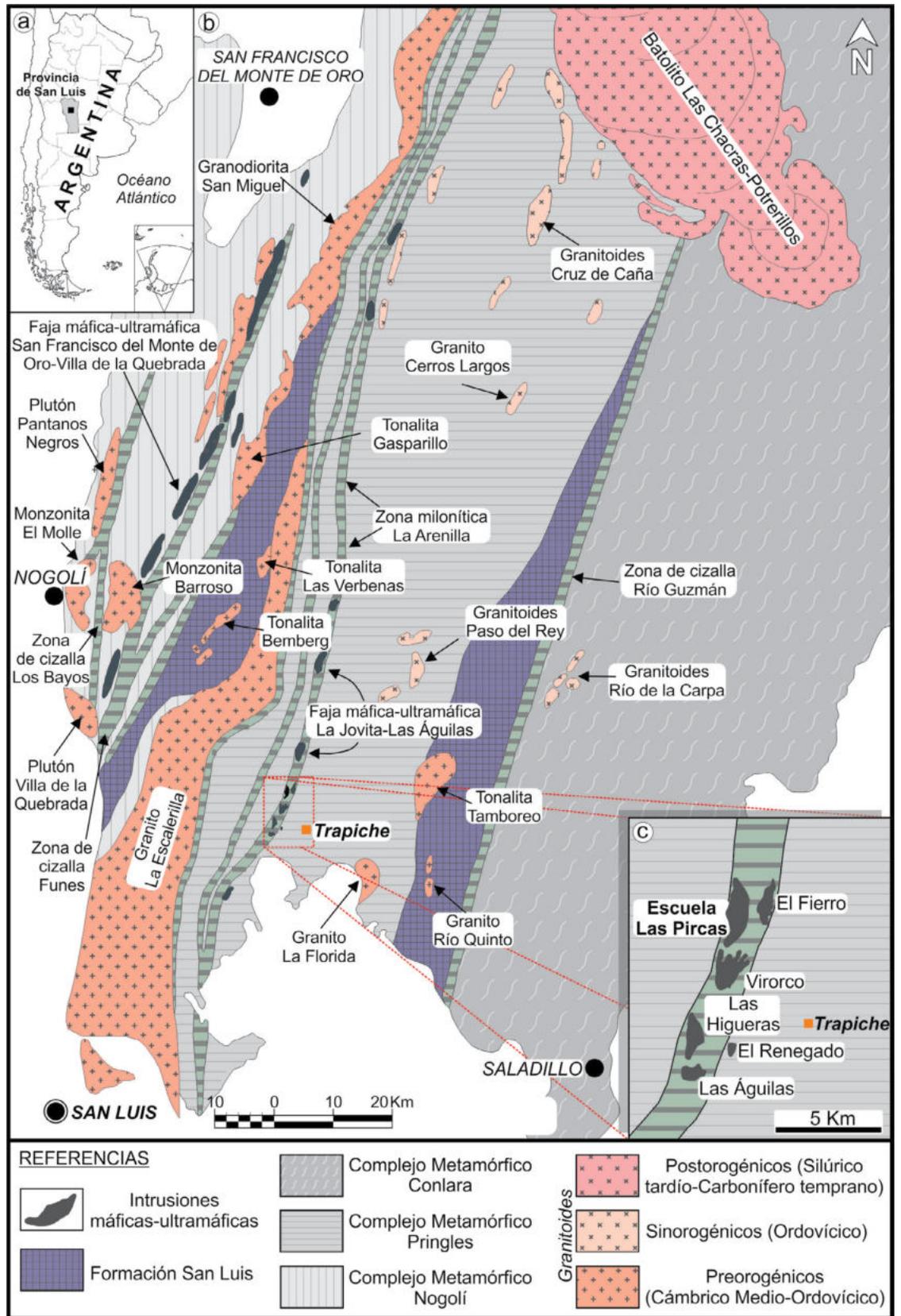
Según Steenken *et al.* (2008), las Sierras Pampeanas Orientales constituyen un basamento de edad proterozoica-paleozoica temprana, afectado por una deformación polifásica producto de la acreción de diferentes terrenos al margen proto-Andino de Gondwana. Asimismo, estos autores indican que su historia deformacional se divide en tres episodios principales de edades Cámbrico temprano (540-510 Ma), Cámbrico-Ordovícico (500-440 Ma) y Devónico (420-350 Ma), definidos como ciclo orogénico Pampeano, Famatiniano y Achaliano, respectivamente (Ramos *et al.* 1986; Sims *et al.* 1997, 1998, Rapela *et al.* 1998a, b, Stuart-Smith *et al.* 1999, Siegesmund *et al.* 2004, Steenken *et al.* 2004).

De acuerdo con el grado metamórfico impuesto por los diferentes ciclos orogénicos mencionados, Sims *et al.* (1997) dividieron

el basamento del sector sur de la Sierra Grande de San Luis en tres complejos metamórficos principales, denominados de este a oeste Complejo metamórfico Conlara, Complejo metamórfico Pringles y Complejo metamórfico Nogolí. Estos presentan un rumbo estructural NNE y están separados por cinturones de deformación dúctil denominados Río Guzmán (límite Complejo metamórfico Conlara - Complejo metamórfico Pringles) y Trapiche (límite Complejo metamórfico Pringles - Complejo metamórfico Nogolí) (Sims *et al.* 1997, 1998, Steenken *et al.* 2004, 2006) (Fig. 1). Asimismo, Wul *et al.* (2017) señala que el pico metamórfico registrado por los mismos es equivalente a facies anfífolita, exceptuando en el sector central del Complejo metamórfico Pringles donde se reconocen rocas en facies granulita.

El Complejo metamórfico Conlara está constituido principalmente por esquistos, gneises y migmatitas en facies anfífolita, y en menor medida por mármoles y rocas calcosilicáticas (Kilmurray 1981, 1982, Kilmurray y Dalla Salda 1977, Llambías y Malvicini 1982, Ortiz Suárez 1988, 1996, Delakowitz *et al.* 1991, López de Luchi 1996, López de Luchi *et al.* 2003). Por su parte, el Complejo metamórfico Pringles se compone principalmente de esquistos, paragneisses, migmatitas y anfífolitas y cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos (faja La Jovita-Las Águilas), tonalíticos-granodioríticos y pegmatíticos (Sims *et al.* 1997, von Gosen and Prozzi 1998, Steenken *et al.* 2008). Dichas intrusiones máficas-ultramáficas son acompañadas por más de 100 km de longitud por una zona de cizalla dúctil denominada zona milonítica La Arenilla (Ortiz Suárez *et al.* 1992, von Gosen y Prozzi 1998), la cual es subvertical o fuertemente buzante hacia el este y alcanza un ancho de varias centenas de metros (Sato *et al.* 2003). En tanto, el Complejo metamórfico Nogolí comprende 1) una asociación supra cortical compuesta por metapelitas, metacuarzitas, metavulcanitas máficas-ultramáficas y en menor medida formaciones de hierro bandeado, mármoles y rocas calco-silicatadas y 2) orto- y paragneisses, migmatitas y ortoanfífolitas intruidas por monzonitas y granitos (Sims *et al.* 1997, 1998, González 2000).

Además de los complejos metamórficos



mencionados, la estratigrafía del sector sur de la sierra Grande de San Luis comprende la Formación San Luis (Prozzi y

Ramos 1988, Prozzi 1990), la cual está dispuesta con dirección general NNE, mediante contactos tanto tectónicos como

transicionales entre dichos complejos (Fig. 1). Esta unidad está compuesta por una alternancia de filitas y metacuacitas a

metagravacas, escasos bancos metaconglomerádicos y metavolcanitas ácidas, en facies de esquistos verdes.

En lo que respecta a los rasgos estructurales de las unidades mencionadas, Sato *et al.* (2003), señalan que estos tres complejos metamórficos presentan una estructuración penetrativa subvertical en dirección NNE, la cual identificaron también en los cuerpos intrusivos que componen la faja máfica-ultramáfica, que habría sido originada por la orogenia Famatiniana, del período Ordovícico. Dichos autores también identificaron rasgos remanentes de una estructuración anterior en dirección NO, la cual atribuyeron al ciclo Pampeano. Por otra parte, Delpino *et al.* (2001) establecen que el sector central de la sierra Grande de San Luis fue afectado por dos eventos de deformación principal, T2 y T3, asociados a las fases finales del ciclo orogénico Pampeano (Sims *et al.* 1998) y al ciclo orogénico Famatiniano (Ortiz Suarez *et al.* 1992, von Gosen y Prozzi 1996 y referencias en ellos citadas), respectivamente. Según estos autores, el primero de ellos estaría evidenciado por una foliación de plano axial (S2), observada en los cuerpos máficos-ultramáficos, la cual es subvertical y fuertemente buzante, mayormente hacia el oeste, mientras que el evento posterior, T3, generaría foliación milonítica (Sm) regular, bien desarrollada y fuertemente buzante, generalmente hacia el este.

## MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La variedad litológica de los cuerpos máficos-ultramáficos aflorantes en el sector sur de la faja La Jovita-Las Águilas comprende principalmente dioritas, noritas, piroxenitas, gabros, melagabros, harzburgitas, dunitas, melanoritas, gabronoritas, broncitas y peridotitas (Kilmurray y Villar 1981, Sabalúa *et al.* 1981, Sabalúa 1986, Gervilla *et al.* 1993, Brogioni 1994, 2001, Malvicini y Brogioni 1996, Ferracutti y Bjerg 2001, Ferracutti *et al.* 2007). La paragénesis mineral reconocida en dichas rocas comprende 1) ortopiroxeno (opx) + anfíbol (amp) + plagioclasa (pl) ± clinopiroxeno (cpx) ± biotita (bt) ± espinelo (spl) ± sulfuros ± minerales del grupo del platino y minerales acceso-

rios como apatito y, 2) olivino (ol) + espinelo (spl) + sulfuros ± minerales del grupo del platino (Hauzenberger *et al.* 1996, 1997a, b, Felfernig *et al.* 1997, Mogessie *et al.* 2000, Ferracutti 2005, Ferracutti *et al.* 2007).

En base a estudios geofísicos de radiometría, magnetismo y gravimetría, Kostadinoff *et al.* (1998a, b), establecieron que estos cuerpos máficos-ultramáficos serían parte de una misma intrusión, la cual se ubicaría en profundidad por debajo del basamento metamórfico. Estos autores identificaron una anomalía geofísica denominada Anomalía Virorco, la cual sería causada por un cuerpo en profundidad de morfología elipsoidal, con dimensiones que alcanzan los 20x8x5 kilómetros.

Tal como se mencionó anteriormente, Ferracutti *et al.* (2011) fueron los primeros que contemplaron aspectos de la estratigrafía ígnea de los cuerpos máficos-ultramáficos de San Luis. Más recientemente, Ferracutti *et al.* (2017) efectuaron un estudio estratigráfico detallado del cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Virorco, lo que permitió, en base a características petrográficas y geoquímicas, diferenciar tres sectores principales en este cuerpo: el sector este, constituido por la unidad estratificada modal; el sector central, constituido por la unidad piroxenítica macro-estratificada y por la unidad gábrica; y el sector oeste, conformado por la unidad bandeada, la unidad norítica hornblendífera y la unidad gabronorítica. Según estos autores, las unidades definidas en los sectores este y oeste corresponden a la serie de borde marginal, mientras que las definidas en el sector central corresponden a la serie estratificada.

## METODOLOGÍA

El trabajo de campo consistió en el levantamiento de dos perfiles de muestreo, A-A' y B-B', realizados en los sectores norte y sur del cuerpo, respectivamente (Fig. 2). De los puntos más representativos de dichos perfiles se recolectaron 25 muestras de roca, a partir de las cuales se confeccionaron 15 secciones delgadas y 9 secciones bipulidas en el Laboratorio de Petrología del Departamento de Geología-INGEOSUR, de la Universidad Nacional del Sur y el CONICET.

Los análisis de química mineral de elementos mayoritarios fueron realizados en un total de nueve muestras, de las cuales dos corresponden a las unidades hornblendítica piroxenítica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, dos corresponden a la unidad norítica hornblendífera inferior (una al miembro-a y una al miembro-b) y cinco corresponden a la unidad norítica hornblendífera superior (dos al miembro-a y tres al miembro-b) (Cuadros 1 y 2). Los mismos fueron llevados a cabo en el *Department of Lithospheric Research, University of Vienna, Austria*, con una microsonda electrónica (EMPA, *Electron Probe Microanalyzer*) Cameca SX100, equipada con cuatro espectrómetros WDS (espectrómetro dispersor de longitud de onda) y un espectrómetro EDS (espectrómetro dispersor de energía). Las condiciones instrumentales correspondieron a un voltaje de aceleración de 15kV y una corriente de 20nA. El análisis de los cristales de plagioclasa fue realizado con un haz de electrones desenfocados de 5 µm de diámetro con la finalidad de evitar la pérdida de cationes de sodio. La calibración fue realizada mediante estándares de minerales naturales y sintéticos, y fue aplicado el método PAP (Pouchou y Pichoir 1991) para la corrección matricial. Los resultados de estos análisis están expresados en porcentaje en peso de óxidos (% en peso) (Cuadro 2).

Los análisis químicos de roca total de elementos mayoritarios y trazas fueron llevados a cabo en un total de once muestras, de las cuales dos corresponden a las unidades hornblendítica piroxenítica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, cuatro corresponden a la unidad norítica hornblendífera inferior (dos al miembro-a y dos al miembro-b) y cinco corresponden a la unidad norítica hornblendífera superior (dos al miembro-a y tres al miembro-b) (Cuadro 3). Los mismos fueron realizados en el laboratorio ActLabs (Activation Laboratories) en Canadá, mediante la aplicación de las técnicas de fluorescencia de rayos-X (XRF) para la medición de concentración de los óxidos mayoritarios, MnO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, y de espectrometría de masas de plasma acoplado por inducción (ICP-MS) para la medición de los elementos traza,

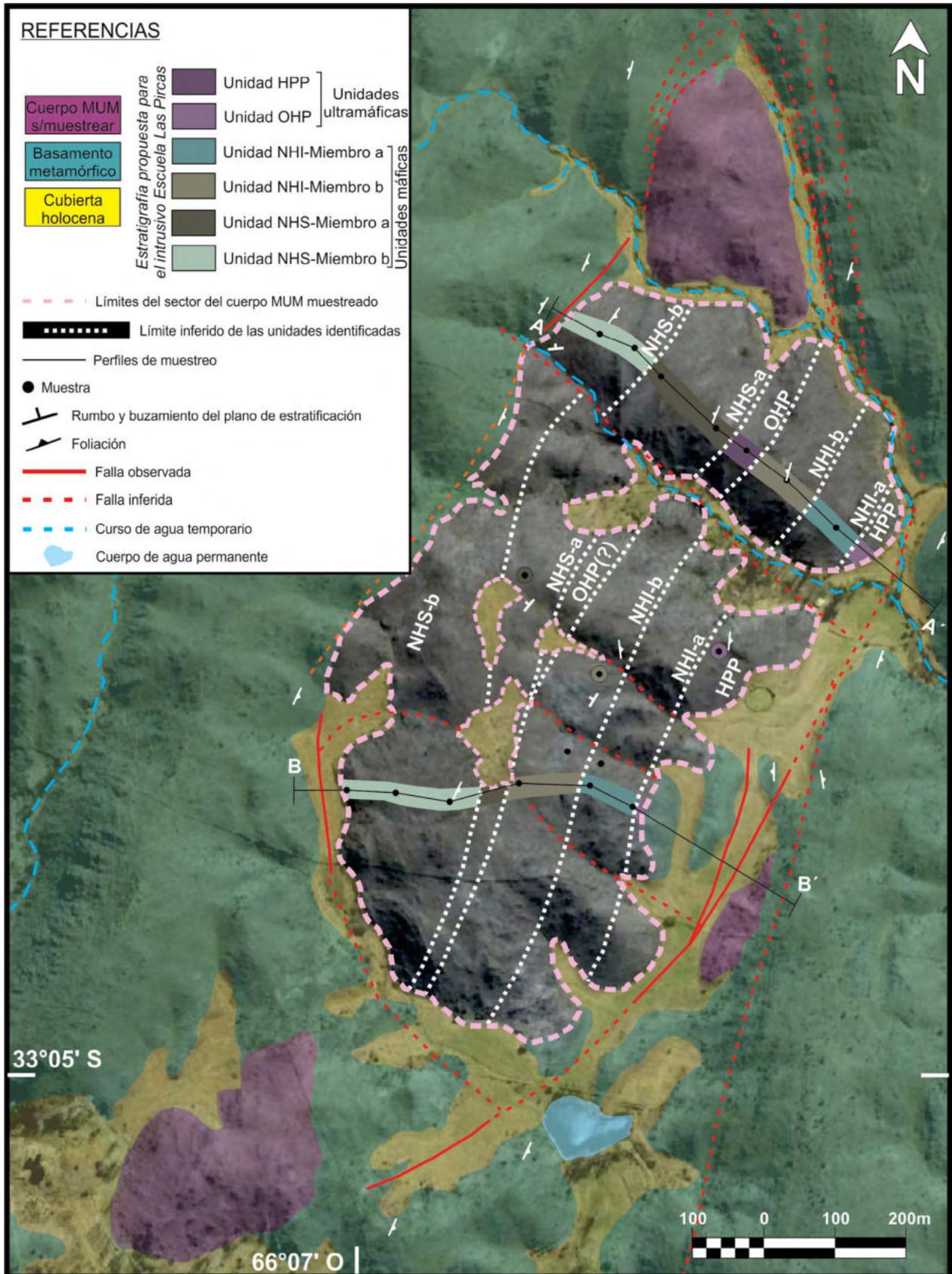
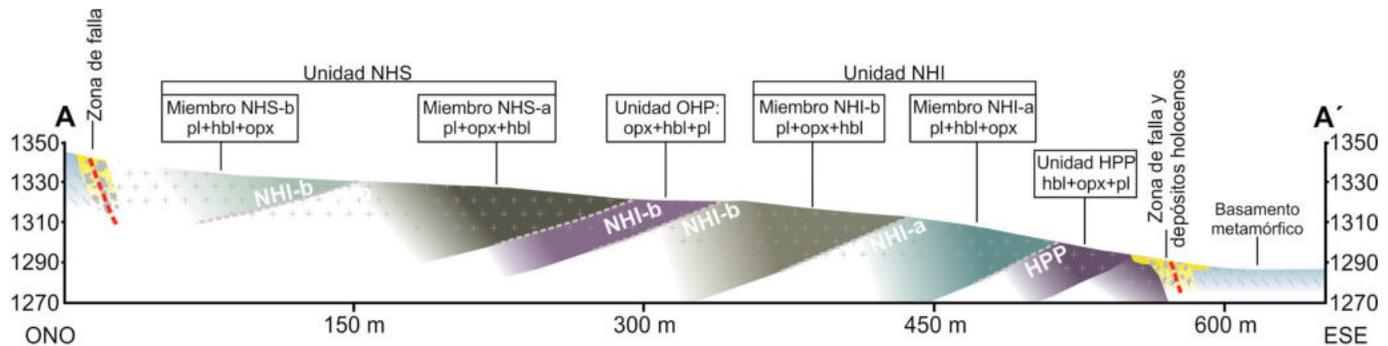


Figura 2. Mapa geológico del cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas en el cual se indican las unidades y los miembros que lo conforman. Nótese la ubicación de los perfiles de muestreo A-A' y B-B'. Las abreviaturas son equivalentes a las de la figura 1.



**Figura 3.** Corte transversal esquemático correspondiente al perfil de muestreo A-A'. Sobre el mismo se indican las unidades y miembros atravesados por este corte, con su respectiva asociación mineralógica simplificada. Las abreviaturas son equivalentes a las de la figura 1.

previa preparación de la muestra con mollienda en molino de acero y fusión de las mismas mediante la utilización de metaborato/tetraborato de litio. Los contenidos de  $Fe_2O_{3total}$  fueron recalculados a  $FeO_{total}$ . Las concentraciones de  $Fe_2O_{3total}$  fueron divididas por 1,11135, obteniendo así los valores de  $FeO_{total}$  de cada muestra. Posteriormente, se realizó el recalcúlo de los contenidos de óxidos mayoritarios para cada muestra, multiplicándolos por un factor equivalente a la relación entre el total del análisis de laboratorio y el total con  $FeO_{total}$ . Los resultados de estos análisis están expresados en porcentaje en peso para los elementos mayoritarios y en partes por millón (ppm) para los elementos traza (Cuadro 2).

Se utilizaron las abreviaturas de minerales sugeridas por Whitney y Evans (2010) para hacer referencia a los silicatos y óxidos.

### Terminología de las intrusiones estratificadas

El modelo estratigráfico ideal de una intrusión de tipo estratificada está compuesto por tres series estratigráficas diferentes, la serie estratificada, la cual cristaliza sobre el piso de la cámara magmática; la serie de borde superior, la cual cristaliza desde el techo hacia el interior de la cámara, y la serie de borde marginal, que cristaliza desde los márgenes laterales hacia el centro de la cámara magmática (Wager y Deer 1939, Wager 1960, Wager y Brown 1968, McBirney 1989, Cawthorn 1996).

Según la terminología propuesta por Irvine (1982), los cuerpos o complejos estratificados pueden ser subdivididos con el siguiente orden de jerarquía decreciente: Series, Zonas y Subzonas, las cuales se establecen en base a diferencias moda-

les, texturales y/o crípticas. Asimismo, establece la posibilidad de definir unidades en base a rasgos composicionales distintivos, las cuales pueden a su vez subdividirse en miembros y/u organizarse en grupos.

A lo largo de este trabajo, en repetidas ocasiones se realizan comparaciones y se establecen analogías entre el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y el cuerpo estratificado de Skaergaard debido a que este último representa, mundialmente, el mejor ejemplo de aplicación de la terminología mencionada. Wager y Deer (1939), Wager (1960), Wager y Brown (1968) y McBirney (1989), identificaron en el cuerpo intrusivo Skaergaard la presencia de tres series principales: la serie estratificada, la serie de borde superior, y la serie de borde marginal. En base a características petrográficas, texturales y/o geoquímicas, cada una de las series mencionadas esta subdividida en zonas, las cuales pueden correlacionarse entre sí a lo largo de las distintas series.

### RELACIONES DE CAMPO Y PETROGRAFÍA

El cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas presenta una morfología elipsoidal, con un eje mayor en dirección NNE, el cual alcanza 2,4 km, y un eje menor en dirección ONO, el cual no supera 1 km de longitud. El mismo se encuentra limitado tanto en sus márgenes este y oeste, como en sus márgenes norte y sur, por zonas de falla (con presencia de milonitas y brechas) que ponen en contacto a las rocas ígneas con el basamento metamórfico (Fig. 2). Este cuerpo es una estructura masiva,

carente de una estratificación conspicua, en el cual se definieron cuatro unidades estratigráficas, aflorantes en forma de bandas orientadas en dirección NNE, dos de ellas de naturaleza ultramáfica y dos de naturaleza máfica (Fig. 2). Sin embargo, la carencia de una estratificación conspicua y la abundante cobertura holocena, dificulta la observación de los límites entre las diferentes unidades, motivo por el cual la diferenciación entre las distintas unidades se basa tanto en estudios petrográficos como geoquímicos.

Estas unidades, y sus correspondientes miembros, fueron representadas en un corte transversal confeccionado a partir del perfil de muestreo A-A' (Fig. 3). Este es netamente esquemático y los espesores de cada una de las unidades representadas en el mismo no pudieron ser medidos en forma directa durante los trabajos de campo, debido a las condiciones anteriormente mencionadas, sino que fueron estimados en base al muestreo de cada una de las unidades y miembros definidos. Asimismo, los ángulos de buzamiento de las distintas unidades corresponden a afloramientos en los cuales se pudo medir una estratificación incipiente de rumbo NE, levemente buzante hacia el NO.

En base a su moda mineral, las rocas ígneas que componen el cuerpo intrusivo fueron clasificadas como noritas hornblendíferas, hornblenditas piroxénicas con plagioclasa y ortopiroxenitas hornblendíferas con plagioclasa, según el diagrama de clasificación px-pl-hbl (Le Maitre 2002) (Fig. 4). En el cuadro 1 se muestra la asociación mineral de cada una de las unidades definidas en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas.

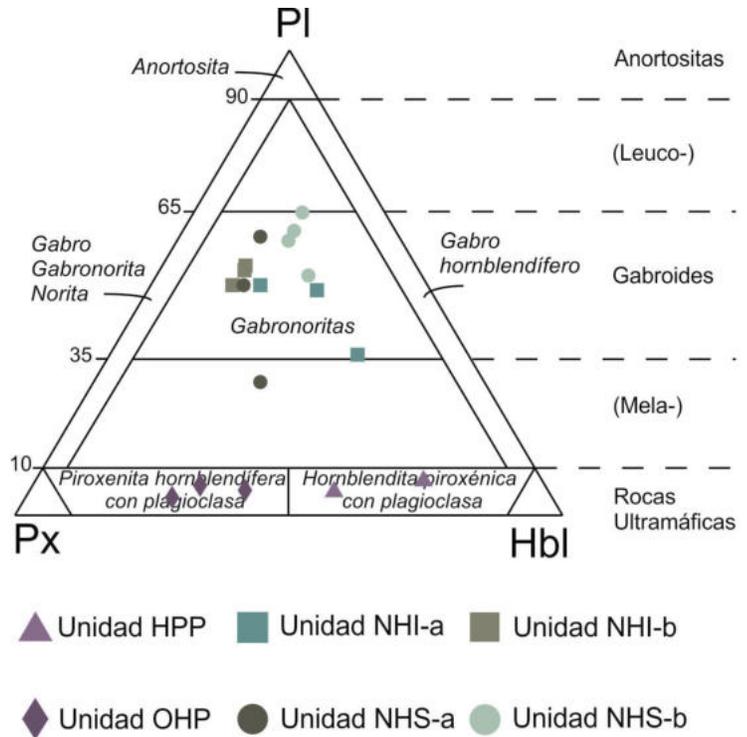
### Unidades ultramáficas

**Unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa:** Los afloramientos de esta unidad están representados por rocas de coloración gris oscura con textura granosa mediana a fina (Fig. 5a). Los mismos están localizados en el extremo este del cuerpo, presentan un ancho máximo de 100 metros y están limitados en su margen este por una falla que los separa del basamento metamórfico y en su margen oeste por el miembro-a de la unidad norítica hornblendífera inferior (Figs. 2 y 3). El análisis microscópico evidencia que son rocas xenomórficas inequigranulares, con cristales de tamaño variable entre 0,2 y 2,8 mm (Fig. 5b), cuya asociación mineralógica es hbl+opx+pl±cpx±op±ath.

La fase de mayor abundancia está representada por cristales anhedrales de hornblenda (55 %), los cuales en ocasiones conforman oikocristales que alcanzan 2,8 mm y contienen chadocristales de ortopiroxeno (Fig. 5c) y plagioclasa, y pequeñas inclusiones de minerales opacos. Los cristales de ortopiroxeno (35 %) son anhedrales, con dimensiones que varían entre 0,4 y 0,8 mm. Estos pueden presentar exsoluciones de clinopiroxeno y reemplazos pseudomórficos parciales de hornblenda y/o antofilita a partir de los planos de clivaje, y pequeñas inclusiones de minerales opacos. Las fases mineralógicas de menor abundancia están representadas por cristales anhedrales de plagioclasa (5 %), de tamaños variables entre 0,2 y 0,7 mm, y por cristales subhedrales a anhedrales de clinopiroxeno (<3 %) de dimensiones que oscilan entre 0,2 y 0,8 mm.

**Unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa:** La porción aflorante de esta unidad presenta un ancho aproximado de 80 metros que disminuye hacia el sur, acuciándose entre el miembro-b de la

**Figura 4.** Diagrama de clasificación de las rocas ígneas aflorantes según las proporciones modales de px-pl-hbl (clasificación según Le Maitre 2002). Las abreviaturas son equivalentes a las de la figura 1.



unidad norítica hornblendífera inferior y el miembro-a de la unidad norítica hornblendífera superior, los cuales constituyen sus límites este y oeste, respectivamente (Figs. 2 y 3). En afloramiento, las rocas que componen esta unidad son de coloración gris oscuro y de grano medio a fino (Fig. 5d).

Microscópicamente evidencian una textura xenomórfica inequigranular conformada por cristales de tamaño variable entre 0,2 y 2 mm (Fig. 5e), con la siguiente asociación mineralógica: opx+hbl+pl+op±ath. Las muestras estudiadas presentan evidencias de deformación sobrepuesta representadas por microfracturas a partir de las cuales los cristales de ortopiroxeno y hornblenda son reemplazados pseudomórficamente por antofilita. Particular-

mente en el sector sur de la intrusión, las rocas que componen este miembro muestran estructuras de tipo S-C en las cuales las superficies de cizalla están definidas por cristales de fibrosos de antofilita (Fig. 5f).

El ortopiroxeno (52 %) es anhedral, su tamaño varía entre 0,4 y 2 mm, contiene pequeñas inclusiones de minerales opacos, frecuentemente exhibe exsoluciones de clinopiroxeno a partir de los planos de clivaje y en ocasiones evidencia reemplazos pseudomórficos de antofilita vinculados mayormente a planos de clivaje. La hornblenda (40 %) es anhedral y en ocasiones está representada por oikocristales que alcanzan dimensiones de hasta 2 mm, los cuales contienen chadocristales de ortopiroxeno. En las rocas de esta unidad,

**CUADRO 1.** Estratigrafía del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y asociación mineral de las unidades que lo conforman. Las abreviaturas corresponden a: unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa (HPP), unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa (OHP), miembro-a de la unidad norítica hornblendífera inferior (NHI-a), miembro-b de la unidad norítica hornblendífera inferior (NHI-b), miembro-a de la unidad norítica hornblendífera superior (NHS-a) y miembro-b de la unidad norítica hornblendífera superior (NHS-b).

Unidad	HPP	OHP	HNI		NHS	
Miembro	-	-	NHI-a	NHI-b	NHS-a	NHS-b
Asociación mineral	Hbl (55%) + opx (35%) + pl (5%) + cpx (<3%) + op (<2%)	Opx (52%) + hbl (40%) + pl (5%) + op (<3%)	Pl (35-50%) + hbl (20-45%) + opx (17-21%) ± cpx (<3%) ± op (<1%)	Pl (50-53%) + opx (31-35%) + hbl (15-17%) ± op (<1%)	Pl (28-59%) + opx (22-38%) + hbl (15-31%) ± cpx (<4%) ± op (<1%)	Pl (51-64%) + hbl (21-28%) + opx (12-18%) ± cpx (<4%) ± op (<1%)

cristales anhedrales de plagioclasa (5 %) constituyen la fase mineralógica de menor abundancia, con dimensiones variables entre 0,2 y 0,6 mm.

### Unidades máficas

Estas unidades están representadas por noritas hornblendíferas, en las cuales los cristales de plagioclasa, hornblenda y ortopiroxeno representan las fases mineralógicas de mayor abundancia. En ellas son frecuentes las texturas de reacción con recristalización en los contactos entre los cristales de hornblenda y plagioclasa, las cuales exhiben un ancho muy limitado, que no supera 0,1 mm. Dichas texturas de reacción están representadas por un fino intercrecimiento de anfíbol, plagioclasa y cuarzo (Fig. 5g).

*Unidad norítica hornblendífera inferior:* Esta unidad, limitada al este por la unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa y al oeste por la unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa (Figs. 2 y 3), se compone de rocas, que en afloramiento presentan coloración gris media, textura masiva y están dispuestas en forma de bochones producto de la erosión catafilar (Fig. 5h). Microscópicamente estas rocas presentan una textura xenomórfica inequigranular fina a media (0,2 a 1,4 mm), en las que se destaca la presencia de una leve isoorientación de los cristales de ortopiroxeno pseudoparalela a la estratificación (Fig. 5i). En base a la relación de abundancia modal opx/hbl, esta unidad fue subdividida en dos miembros denominados, de este a oeste, norítica hornblendífera inferior -a (NHI-a) y norítica hornblendífera inferior -b (NHI-b).

*Miembro-a de la unidad norítica hornblendífera inferior:* Las rocas de este miembro conforman una banda con un ancho constante de aproximadamente 70 metros. Las mismas presentan mayor proporción de cristales de hornblenda en relación a los de ortopiroxeno, y su asociación mineralógica es: pl+hbl+opx+op±cpx±bt±qz±ap.

Los cristales de plagioclasa (35-50 %) constituyen la fase mineralógica de mayor abundancia, son anhedrales, con tamaños que oscilan entre 0,2 y 2 mm, y ocasionalmente presentan escasas inclusiones de apatito. Los cristales de hornblenda (20-45%) son anhedrales y en ocasio-

nes conforman oikocristales que alcanzan dimensiones de hasta 2 mm, los cuales contienen chadocristales de plagioclasa (Fig. 5j) y de ortopiroxeno. Asimismo es posible apreciar escasos sectores donde la hornblenda es reemplazada pseudomórficamente por biotita. Los piroxenos están representados mayormente por cristales anhedrales de ortopiroxeno (17-21 %), con dimensiones variables entre 0,2 y 1 mm y por una escasa proporción de cristales anhedrales de clinopiroxeno (<3 %) de dimensiones variables entre 0,2 y 0,6 mm. El ortopiroxeno es reemplazado pseudomórficamente de manera parcial por hornblenda a partir de planos de clivaje y fracturas intracristalinas (Fig. 5k) y contiene pequeñas inclusiones de plagioclasa y minerales opacos.

*Miembro-b de la unidad norítica hornblendífera inferior:* Las rocas de este miembro conforman una banda de ancho constante de aproximadamente 100 metros y presentan una asociación mineral conformada por pl+opx+hbl+op±cpx±bt±ath. Los afloramientos de este miembro que se encuentran en la parte sur del cuerpo intrusivo presentan una fuerte alteración, con abundantes reemplazos de antofilita en ortopiroxeno y hornblenda (Fig. 5l).

Los cristales de plagioclasa (50-53 %) son anhedrales, con dimensiones variables entre 0,2 y 1,2 mm. El ortopiroxeno (31-35 %) está representado por cristales anhedrales de dimensiones variables entre 0,4 y 1,2 mm, los cuales presentan exsoluciones de clinopiroxeno a partir de los planos de clivaje y reemplazos pseudomórficos parciales de hornblenda a partir de sus bordes y de planos de clivaje (Fig. 5m). Los cristales de hornblenda (15-17 %) son anhedrales, con dimensiones variables entre 0,2 y 0,8 mm, frecuentemente presentan pequeñas inclusiones de minerales opacos y ocasionalmente exhiben limitados sectores de sus bordes cristalinos reemplazados por biotita. Los cristales de clinopiroxeno, presentes en proporciones accesorias, son anhedrales y exhiben dimensiones que no superan 0,1 mm.

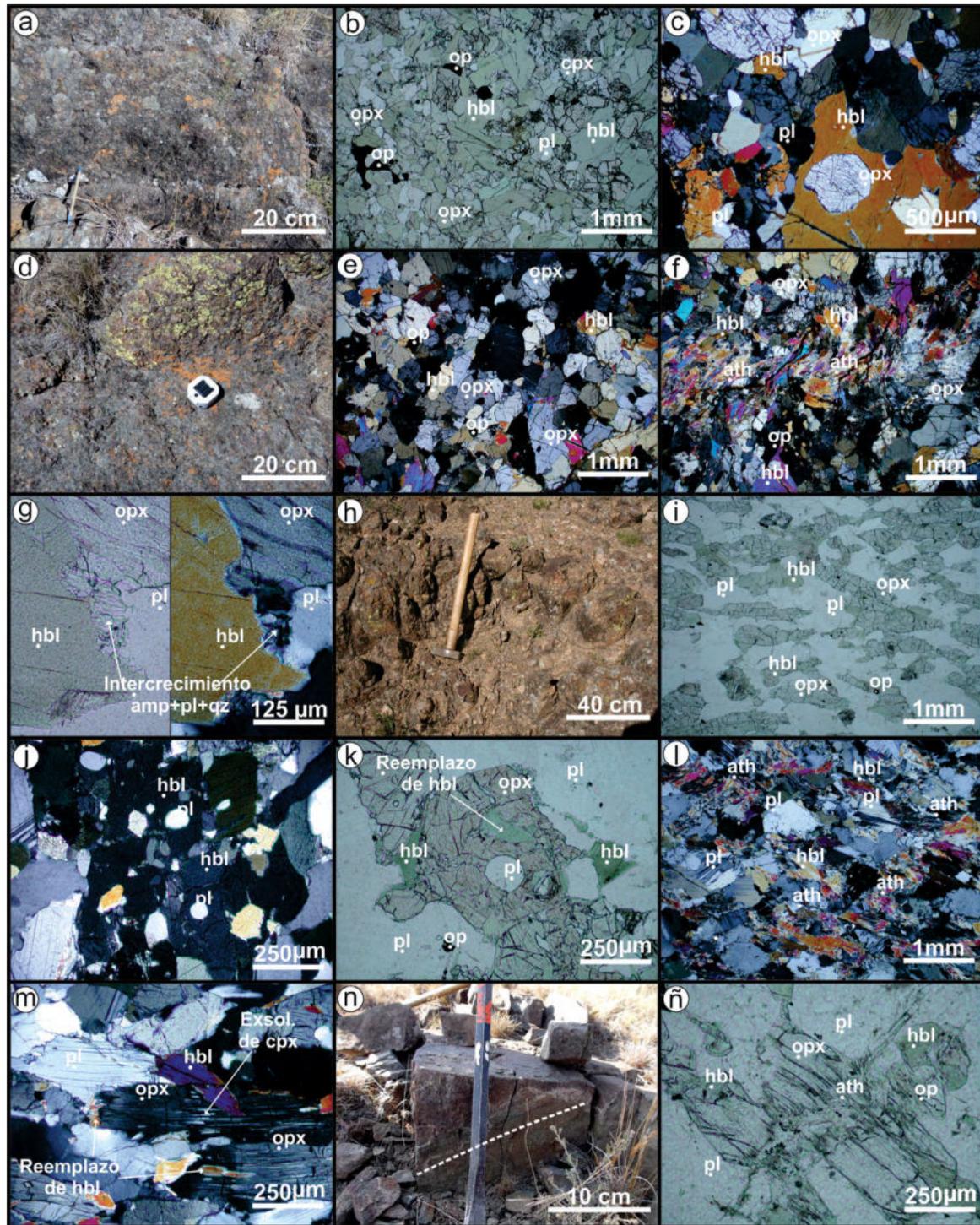
*Unidad norítica hornblendífera superior:* Esta unidad aflora en el extremo oeste del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, limitada al este por la unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa y al oeste por una falla que la separa del ba-

samento metamórfico encajonante (Figs. 2 y 3). La misma se compone de rocas de tonalidad gris media y aspecto masivo, en las que se pueden apreciar evidencias de una estratificación modal poco conspicua, con presencia de intercalaciones de niveles de hasta 10 cm de espesor con proporciones modales de plagioclasa más elevadas, lo que les otorga una tonalidad más clara (Fig. 5n). Microscópicamente estas rocas evidencian una textura xenomórfica inequigranular fina a media (0,2 a 2 mm). Según la relación de abundancia modal opx/hbl, esta unidad fue subdividida en dos miembros denominados, de este a oeste, como norítica hornblendífera superior-a (NHS-a) y norítica hornblendífera superior-b (NHS-b).

*Miembro-a de la unidad norítica hornblendífera superior:* Los afloramientos de este miembro conforman una banda de ancho variable, que alcanza un máximo de 120 metros en la porción norte del cuerpo, y se acuña hacia el sur hasta disminuir su ancho hasta aproximadamente 40 metros. Los mismos están constituidos por rocas cuya asociación mineral es pl+opx+hbl±cpx±op±bt±ap±qz. Las rocas de este miembro aflorantes en el sector sur del cuerpo presentan una fuerte alteración, evidenciada por una elevada proporción de cristales de ortopiroxeno y hornblenda reemplazados pseudomórficamente de manera parcial por antofilita.

Los cristales de plagioclasa (28-59 %) son anhedrales, sus dimensiones oscilan entre 0,2 y 2 mm, y contienen escasas inclusiones de apatito. Los cristales ortopiroxeno (22-38 %) son anhedrales, de tamaño variable entre 0,2 y 0,8 mm, y presentan reemplazos pseudomórficos parciales de antofilita a partir de microfracturas (Fig. 5ñ) e inclusiones de minerales opacos. Los cristales de hornblenda (15-31 %) son anhedrales, de tamaño variable entre 0,2 y 0,6 mm, pueden ser reemplazados pseudomórficamente de manera parcial por antofilita a partir de microfracturas y por biotita a partir de los bordes cristalinos y pueden contener inclusiones de plagioclasa y minerales opacos. Los escasos cristales de clinopiroxeno (<4 %) reconocidos son anhedrales, con dimensiones que oscilan entre 0,14 y 0,6 mm, y contienen inclusiones de plagioclasa.

*Miembro-b de la unidad norítica horn-*



**Figura 5.** a) Afloramiento de la unidad hornbléndica piroxénica con plagioclasa (HPP) b) Fotomicrografía sin polarizador interpuesto de una hornbléndica piroxénica con plagioclasa (unidad HPP). Se observa la textura general de las rocas de esta unidad c) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una hornbléndica piroxénica con plagioclasa (unidad HPP). Se puede apreciar oikocristal de hornblenda con chadocristales de ortopiroxeno d) Afloramientos de la unidad ortopiroxenítica hornbléndica con plagioclasa (unidad OHP) e) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una ortopiroxenita hornbléndica con plagioclasa (unidad OHP). Se observa la textura general de la roca f) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una ortopiroxenita hornbléndica con plagioclasas (unidad OHP). Cristales de ortopiroxeno y hornblenda reemplazados por antofilita en sectores próximos a las microfracturas g) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una norita hornbléndica (unidad NHS). Borde de reacción entre los cristales de plagioclasa y hornblenda h) Afloramientos de la unidad norítica hornbléndica inferior (NHI) i) Fotomicrografía sin polarizador interpuesto de una norita hornbléndica (unidad NHI). Textura general de la roca en la que se puede apreciar una leve isoorientación de los cristales de ortopiroxeno j) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una norita hornbléndica (unidad NHI). Oikocristal de hornblenda con chadocristales de plagioclasa k) Fotomicrografía con polarizador interpuesto de una norita hornbléndica (unidad NHI). Cristal de ortopiroxeno reemplazado por hornblenda l) Textura general de una meta-norita hornbléndica (unidad NHI) m) Ortopiroxeno reemplazado por hornblenda (unidad NHI) n) Afloramientos de la unidad norítica hornbléndica superior (NHS) ñ) Fotomicrografía sin polarizador interpuesto de una norita hornbléndica (unidad NHS). Piroxeno y hornblenda reemplazados por antofilita en sectores próximos a microfracturas.

*blendífera superior*: Si bien a partir de la figura 2 se puede estimar que los afloramientos de este miembro tienen un ancho máximo de 200 metros, la falla que trunca los mismos en su margen oeste no permite establecer su ancho con mayor precisión. Su asociación mineral es  $pl+h-bl+opx\pm cpx\pm op\pm bt\pm ap\pm ath\pm qz$ , en la cual la fase mineral de mayor abundancia está representada por cristales anhedrales de plagioclasa (51-64 %), con dimensiones variables entre 0,2 y 1,6 mm, los cuales contienen escasas inclusiones de apatito y minerales opacos. Los cristales de hornblenda (21-28 %) son anhedrales y en ocasiones conforman oicocristales que pueden alcanzar un tamaño de 2,4 mm, los cuales contienen chadocristales de plagioclasa y ortopiroxeno. En escasas ocasiones, los cristales de hornblenda son reemplazados parcialmente a partir de sus bordes por biotita y antofilita. Los piroxenos están representados principalmente por cristales anhedrales de ortopiroxeno (12-18 %), los cuales varían entre 0,2 y 1 mm, presentan inclusiones de plagioclasa y de minerales opacos y exsoluciones de clinopiroxeno a partir de los planos de clivaje, y por cantidades muy escasas de cristales anhedrales de clinopiroxeno (<4 %), de dimensiones variables entre 0,2 y 1 mm, los cuales pueden exhibir reemplazos pseudomórficos de hornblenda a partir de sus bordes y/o planos de clivaje e inclusiones de plagioclasa.

## QUÍMICA MINERAL

En el cuadro 2 se presentan los valores promedio calculados a partir de los resultados de los análisis de química mineral de elementos mayoritarios realizados en las fases minerales de mayor abundancia de las diferentes unidades definidas en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas.

### Anfíbol

En base a los análisis de química mineral, se determinó, que en las rocas aflorantes del cuerpo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas los minerales del grupo del anfíbol están representados, tanto en las rocas máficas como en las ultramáficas, por Mg-hornblenda (Leake *et al.* 1997). En la figura 6a se representa la concen-

tración de  $FeO_{total}$  versus MgO en los cristales de Mg-hornblenda, los cuales evidencian una correlación negativa en las distintas unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas. El valor promedio del número de magnesio ( $\#Mg=MgO/MgO+FeO_{total}$ ) correspondiente a este mineral es de 0,84 para las rocas ultramáficas (unidades hornblendítica piroxénica con plagioclasa y ortopiroxénica hornblendífera con plagioclasa), y varía entre 0,75 y 0,79 en las rocas máficas (unidades norítica hornblendífera inferior y norítica hornblendífera superior) (Cuadro 2).

### Ortopiroxeno

Los cristales de ortopiroxeno son de tipo enstatita (Morimoto *et al.* 1988). La composición de estos cristales en las rocas ultramáficas es  $En_{(0,75-0,76)}Fs_{(0,23-0,25)}Wo_{(0-0,01)}$  en la unidad ortopiroxénica hornblendífera con plagioclasa y  $En_{(0,78-0,79)}Fs_{(0,20-0,22)}Wo_{(0-0,01)}$  en la unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa. En las rocas máficas de la unidad norítica hornblendífera inferior, la composición de los individuos del miembro-a muestran una disminución en el componente enstatítico - $En_{(0,69-0,70)}Fs_{(0,30-0,31)}Wo_{(0-0,01)}$ , mientras que los cristales de miembro-b exhiben una composición similar a aquellos de las rocas ultramáficas - $En_{(0,74-0,75)}Fs_{(0,24-0,25)}Wo_{(0-0,01)}$ . En la unidad Norítica Hornblendífera Superior, los cristales del miembro-a poseen una composición  $En_{(0,69-0,71)}Fs_{(0,27-0,30)}Wo_{(0-0,01)}$ , mientras que en aquellos del miembro-b la composición es  $En_{(0,67-0,72)}Fs_{(0,28-0,32)}Wo_{(0-0,01)}$ .

En la figura 6b se representa la concentración de  $FeO_{total}$  versus MgO en los cristales de ortopiroxeno, la cual evidencia una correlación negativa en las distintas unidades identificadas. El valor promedio de  $\#Mg$  varía entre 0,76 y 0,79 en las unidades de composición ultramáfica, y entre 0,69 y 0,75 en las unidades de composición máfica (Cuadro 2).

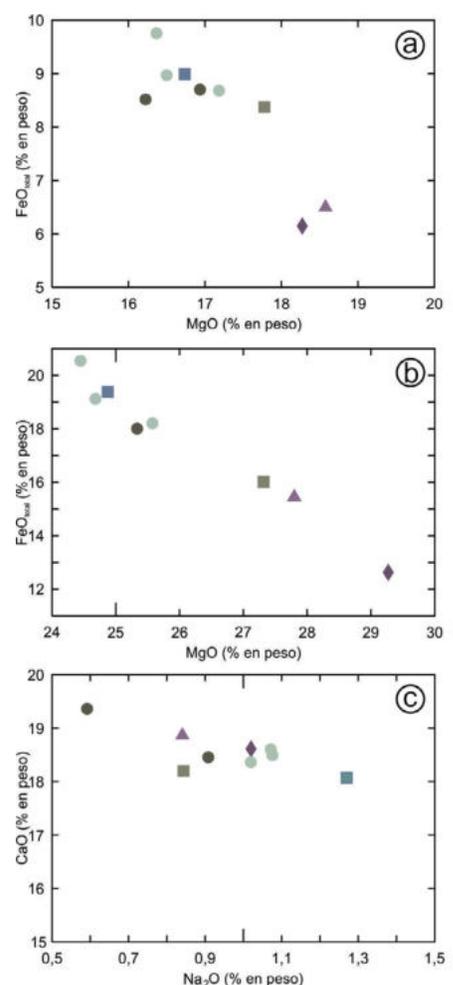
### Plagioclasa

Los cristales de plagioclasa en las rocas ultramáficas clasifican como anortita (Deer *et al.* 1992). Sus proporciones son  $An_{(91,6-93,1)}Ab_{(6,71-8,25)}Or_{(0,12-0,18)}$  en la unidad Hornblendítica Piroxénica con Plagioclasa y  $An_{(90,85-91,08)}Ab_{(8,91-9,14)}Or_{(0)}$  en la unidad Ortopiroxénica Hornblendífera con Plagio-

clasa. En el caso de las rocas máficas, la composición de los cristales de plagioclasa varía entre bitownita y anortita (Deer *et al.* 1992). En la unidad norítica hornblendífera inferior, la composición es  $An_{(88,1-90,3)}Ab_{(9,53-12,0)}Or_{(0,05-0,56)}$  en el miembro-a y  $An_{(91,63-93,41)}Ab_{(6,58-8,36)}Or_{(0)}$  en el miembro-b. En la unidad Norítica hornblendífera superior la composición es  $An_{(90,20-95,23)}Ab_{(4,76-9,76)}Or_{(0,-0,1)}$  en el miembro-a y  $An_{(89,14-91,85)}Ab_{(8,77-11,0)}Or_{(0,05-1,5)}$  en el miembro-b (Cuadro 2).

## GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL

Los resultados de los análisis geoquímicos de roca total de las muestras provenientes de las diferentes unidades que



**Figura 6.** Diagramas bivalentes de elementos mayoritarios para fases minerales a)  $FeO_{total}$  vs. MgO en hornblenda b)  $FeO_{total}$  vs. MgO en ortopiroxeno c) CaO vs.  $Na_2O$  en plagioclasa. Símbolos indicados en la figura 4 y abreviaturas en la figura 1.

**CUADRO 2.** Contenido promedio de elementos mayoritarios en cristales de hornblenda, ortopiroxeno y plagioclasa, correspondientes a muestras del cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas. Las abreviaturas son equivalentes a los del cuadro 1.

Muestra	HPP 06	OHP 45	NHIa 49	NHIb 24	HNSa 42	HNSa 25	HNSb 40	HNSb 26	HNSb 24
Unidad	HPP	OHP	HNI		NHS				
Miembro	-	-	NHI-a	NHI-b	NHS-a			NHS-b	
A.m.s.	hbl+opx+pl	opx+hbl+pl	pl+hbl+opx	pl+opx+hbl	pl+opx+hbl			pl+hbl+opx	
Mineral	Anfibol								
SiO <sub>2</sub>	51,66	49,89	49,71	49,03	47,42	49,09	49,13	49,11	49,94
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,78	0,60	0,98	0,78	0,97	0,81	0,57	0,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,49	8,03	8,02	8,87	9,32	8,46	8,83	7,99	7,37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29	0,44	0,09	0,16	0,20	0,26	0,09	0,05	0,08
MnO	0,11	0,09	0,14	0,09	0,10	0,10	0,13	0,14	0,13
FeO <sub>total</sub>	6,49	6,15	8,99	8,37	8,52	8,70	8,97	9,76	8,68
ZnO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	18,58	18,27	16,74	17,78	16,22	16,94	16,50	16,37	17,19
CaO	12,46	12,09	12,05	11,57	12,18	12,28	11,84	12,00	12,16
Na <sub>2</sub> O	0,58	0,78	0,86	0,59	0,93	0,84	0,78	0,74	0,74
K <sub>2</sub> O	0,38	0,34	0,40	0,34	0,59	0,27	0,36	0,35	0,25
NiO	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Sum	97,62	96,91	97,61	97,78	96,36	97,90	97,45	97,11	97,15
Cationes calculados en base a 23 oxígenos y 15 cationes +K +Na									
Si	7,27	7,08	7,09	6,95	6,88	6,98	7,02	7,07	7,14
Ti	0,06	0,08	0,06	0,10	0,09	0,10	0,09	0,06	0,06
Al	1,08	1,34	1,35	1,48	1,59	1,42	1,49	1,36	1,24
Cr	0,03	0,05	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
Mn <sup>2+</sup>	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Fe <sup>2+</sup>	0,76	0,73	1,07	0,99	1,03	1,04	1,07	1,17	1,04
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	3,90	3,86	3,56	3,76	3,51	3,59	3,51	3,51	3,66
Ca	1,88	1,84	1,84	1,76	1,89	1,87	1,81	1,85	1,86
Na	0,16	0,21	0,24	0,16	0,26	0,23	0,22	0,21	0,20
K	0,07	0,06	0,07	0,06	0,11	0,05	0,07	0,06	0,05
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
#Mg	0,84	0,84	0,77	0,79	0,77	0,78	0,77	0,75	0,78
	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl	Mg-hbl
ND	19	24	14	4	14	3	16	12	15
Ortopiroxeno									
SiO <sub>2</sub>	55,13	54,71	54,14	54,74	53,07	-	53,91	53,11	53,28
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	-	0,05	0,03	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,30	1,56	1,24	1,40	1,52	-	1,74	1,37	1,31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,10	0,03	0,05	0,05	-	0,03	0,01	0,02
FeO <sub>total</sub>	15,44	12,63	19,38	16,01	18,01	-	18,21	20,54	19,12
MnO	0,41	0,30	0,50	0,36	0,41	-	0,41	0,50	0,50
MgO	27,80	29,27	24,87	27,32	25,34	-	25,58	24,45	24,68
NiO	0,00	0,01	0,01		0,01	-	0,01	0,01	0,01
CaO	0,37	0,26	0,37	0,29	0,38	-	0,27	0,34	0,38
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,01		0,00	-	0,01	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Total	100,56	100,26	100,57	100,21	98,84	-	100,21	99,60	99,34

**CUADRO 2 (cont.).** Contenido promedio de elementos mayoritarios en cristales de hornblenda, ortopiroxeno y plagioclasa, correspondientes a muestras del cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas. Las abreviaturas son equivalentes a los del cuadro 1.

Cationes calculados en base a 6 oxígenos									
Si	1,97	1,95	1,97	1,97	1,96	-	1,96	1,96	1,97
Al <sub>4</sub>	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	-	0,04	0,04	0,03
Al <sub>6</sub>	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	-	0,04	0,02	0,02
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Fe <sup>2+</sup>	0,46	0,42	0,59	0,48	0,56	-	0,55	0,61	0,59
Mn <sup>2+</sup>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,02	0,02
Mg	1,48	1,56	1,35	1,46	1,39	-	1,39	1,35	1,36
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Ca	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	-	0,01	0,01	0,01
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
#Mg	0,76	0,79	0,70	0,75	0,71	-	0,71	0,69	0,70
En	0,76	0,78	0,69	0,75	0,71	-	0,71	0,68	0,69
Fs	0,24	0,21	0,30	0,24	0,28	-	0,28	0,31	0,30
Wo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,01
	Enstatita	Enstatita	Enstatita	Enstatita	Enstatita		Enstatita	Enstatita	Enstatita
ND	15	16	18	4	12		18	11	28
<b>Mineral</b>	<b>Plagioclasa</b>								
SiO <sub>2</sub>	44,38	45,01	45,28	45,48	44,54	44,63	44,79	45,10	45,03
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,43	35,10	34,50	35,10	34,34	35,39	35,04	34,98	34,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
FeO <sub>total</sub>	0,24	0,14	0,31	0,10	0,16	0,15	0,22	0,20	0,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,07	0,20	0,00	0,20	0,01	0,02	0,00
CaO	18,86	18,61	18,07	18,20	18,45	19,36	18,49	18,61	18,36
Na <sub>2</sub> O	0,84	1,02	1,27	0,84	0,91	0,59	1,08	1,07	1,02
K <sub>2</sub> O	0,02	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
Total	99,79	99,89	99,54	99,97	98,43	100,38	99,65	99,99	98,84
Cationes calculados en base a 16 oxígenos									
Si	2,05	2,08	2,09	2,10	2,09	2,04	2,07	2,08	2,10
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	1,93	1,91	1,88	1,91	1,90	1,91	1,91	1,90	1,88
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe <sup>2+</sup>	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Mn <sup>2+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Ca	0,93	0,92	0,89	0,90	0,93	0,95	0,92	0,92	0,92
Na	0,08	0,09	0,11	0,08	0,08	0,05	0,10	0,10	0,09
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
%An	92,40	90,94	88,58	92,26	92,07	94,75	90,37	90,56	91,15
%Ab	7,45	0,09	11,27	7,74	0,08	5,25	9,52	9,44	0,10
%Or	0,14	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,11	0,52	0,00
	Anortita	Anortita	Bitownita	Anortita	Anortita	Anortita	Anortita	Anortita	Anortita
ND	8	3	11	3	11	4	17	8	13

ND: número de determinaciones. Mg-hbl: Magnesio hornblenda. \* Los resultados de los análisis de química mineral de los cristales de ortopiroxeno de la muestra NHSa 25 no fueron incluidos en este cuadro debido a que dichos cristales presentan una fuerte alteración a antofilita.

conforman el cuerpo estudiado se presentan en el cuadro 3.

### Elementos mayoritarios

Los contenidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}_{\text{total}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , y  $\text{Na}_2\text{O}$  versus  $\text{MgO}$  (% en peso)

fueron representados en los diagramas binarios de la figura 7, en los cuales es posible observar las diferencias del contenido de  $\text{MgO}$  entre las rocas ultramáficas (unidades hornblendítica piroxénica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendífera

con plagioclasa), el cual oscila entre 18,74 y 23,56 % (Cuadro 3) y las rocas máficas (unidades norítica hornblendífera inferior y norítica hornblendífera superior), el cual varía entre 8,30 y 13,78 % (Cuadro 3). Las concentraciones de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{FeO}_{\text{total}}$

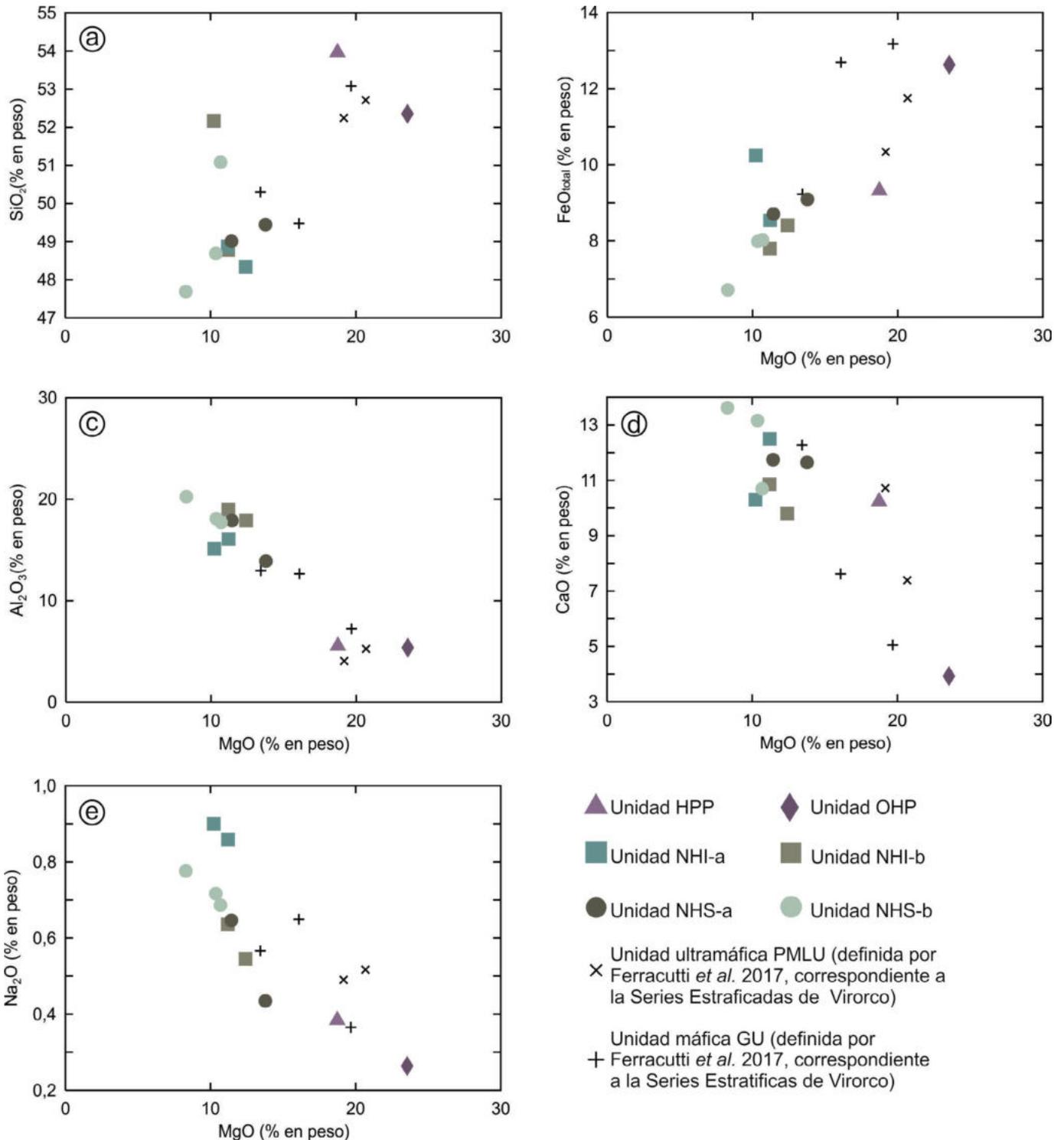


Figura 7. Diagramas de elementos mayoritarios versus  $\text{MgO}$  en roca total a)  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{MgO}$  b)  $\text{FeO}_{\text{total}}$  vs.  $\text{MgO}$  c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs.  $\text{MgO}$  d)  $\text{CaO}$  vs.  $\text{MgO}$  e)  $\text{Na}_2\text{O}$  vs.  $\text{MgO}$ . Las abreviaturas son equivalentes a los de la figura 1.

**CUADRO 3.** Análisis químicos de roca total correspondientes a las unidades definidas en el cuerpo intrusivo máfico-ultramáfico Escuela Las Pircas. Las abreviaturas son equivalentes a los del cuadro 1.

Muestra	HHP06	OHP45	NHla49	NHla29	NHlb47	NHlb24	NHsa42	NHsa25	NHsb40	NHsb26	NHsb24
Unidad	HPP	OHP	NHI				NHS				
Miembro	-	-	NHI-a		NHI-b		NHS-a			NHS-b	
SiO <sub>2</sub>	53,96	52,35	48,78	52,17	48,87	48,33	49,01	49,45	51,08	47,69	48,69
TiO <sub>2</sub>	0,28	0,25	0,29	0,31	0,15	0,12	0,16	0,26	0,19	0,16	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,55	5,37	16,06	15,12	18,98	17,90	17,90	13,90	17,72	20,25	18,09
FeO <sub>total</sub>	9,32	12,63	8,54	10,24	7,80	8,41	8,70	9,09	8,03	6,71	7,99
MnO	0,19	0,22	0,15	0,19	0,14	0,15	0,17	0,17	0,15	0,13	0,15
MgO	18,74	23,56	11,21	10,22	11,20	12,42	11,44	13,78	10,69	8,30	10,37
CaO	10,23	3,92	12,50	10,31	10,85	9,79	11,74	11,65	10,69	13,62	13,16
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,26	0,86	0,90	0,64	0,55	0,65	0,43	0,69	0,78	0,72
K <sub>2</sub> O	0,20	0,10	0,20	0,35	0,09	0,06	0,13	0,08	0,10	0,11	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
LOI	1,27	1,60	1,14	0,49	1,11	1,59	0,46	1,25	0,59	0,85	0,93
<b>TOTAL</b>	<b>100,15</b>	<b>100,28</b>	<b>99,73</b>	<b>100,32</b>	<b>99,84</b>	<b>99,32</b>	<b>100,38</b>	<b>100,06</b>	<b>99,95</b>	<b>98,60</b>	<b>100,38</b>
Cr	1000	1100	270	500	270	140	270	700	170	80	150
Co	62	117	49	32	55	74	51	71	51	40	47
Ni	120	290	70	120	140	40	90	130	30	40	40
Cu	130	250	100	50	160	90	100	120	60	60	60
Zn	60	80	50	80	50	50	70	50	60	60	60
Rb	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sr	38	23	172	162	173	187	185	131	185	216	168
Y	8,70	6,00	6,40	12,10	2,50	1,70	5,80	5,10	5,70	6,30	7,20
Zr	29,00	16,00	14,00	48,00	6,00	6,00	4,00	10,00	23,00	24,00	15,00
Nb	1,00	0,50	0,40	2,20	0,10	0,20	0,10	0,30	0,70	0,40	0,60
Ba	25	9	18	52	22	13	31	30	27	15	18
La	5,51	3,38	2,70	7,42	1,20	1,01	2,28	1,10	4,13	4,17	5,21
Ce	12,90	9,40	6,31	19,00	2,65	1,79	4,99	2,63	9,14	9,46	12,00
Pr	1,51	1,19	0,79	2,31	0,32	0,20	0,63	0,39	1,09	1,20	1,46
Nd	6,05	4,45	3,47	9,00	1,36	0,90	2,68	2,13	4,15	5,04	5,77
Sm	1,52	0,91	0,97	2,01	0,36	0,22	0,82	0,73	1,00	1,19	1,46
Eu	0,38	0,30	0,36	0,65	0,20	0,16	0,36	0,29	0,37	0,39	0,43
Gd	1,71	1,04	1,15	2,22	0,39	0,24	0,78	0,90	1,00	1,23	1,50
Tb	0,30	0,18	0,20	0,35	0,07	0,04	0,16	0,16	0,17	0,21	0,25
Dy	1,74	1,12	1,22	2,16	0,47	0,30	1,06	1,04	1,02	1,27	1,47
Ho	0,32	0,23	0,25	0,44	0,10	0,07	0,21	0,22	0,21	0,24	0,29
Er	0,90	0,69	0,70	1,32	0,31	0,22	0,64	0,63	0,64	0,64	0,79
Tm	0,14	0,10	0,10	0,20	0,05	0,04	0,11	0,10	0,11	0,09	0,12
Yb	0,89	0,69	0,67	1,31	0,35	0,28	0,82	0,68	0,74	0,64	0,79
Lu	0,14	0,11	0,11	0,20	0,06	0,06	0,14	0,11	0,12	0,11	0,12
Hf	0,80	0,50	0,50	1,30	0,20	0,20	0,20	0,30	0,60	0,70	0,50
Ta	0,07	0,04	0,03	0,13	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,03	0,03
Eu/Eu*	0,71	0,93	1,03	0,95	1,59	2,17	1,37	1,11	1,13	1,00	0,89
(La/Yb) <sub>N</sub> condrito	4,44	3,51	2,89	4,06	2,46	2,59	1,99	1,16	4,00	4,67	4,73

evidencian tendencias de correlación positivas con el MgO (Fig. 7a, b). En el caso del  $\text{SiO}_2$ , las concentraciones varían entre 52,35 y 53,96 % en las rocas ultramáficas y entre 47,69 y 52,17 % en las rocas máficas (Cuadro 3), mientras que en el caso del  $\text{FeO}_{\text{total}}$  los contenidos son variables entre 9,32 y 12,63 % en las rocas ultramáficas y entre 6,71 y 10,24 % en las rocas máficas (Cuadro 3). En tanto, las concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  presentan una correlación negativa con el MgO (Fig. 7c, d, e). En el caso de las rocas ultramáficas, las concentraciones varían entre 5,37 y 5,55 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , entre 3,92 y 10,23 % de  $\text{CaO}$  y entre 0,26 y 0,38 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ ; mientras que en las rocas máficas, las concentraciones varían entre 13,90 y 20,25 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , entre 9,79 y 13,62 % de  $\text{CaO}$  y entre 0,43 y 0,90 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  (Cuadro 3). Por otra parte, la relación  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  presenta valores que varían levemente entre 0,55 y 0,84. Sin embargo, la muestra

HPP06, correspondiente a la unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa, presenta un valor de 1,85, siendo la única muestra del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas que excede el rango de valores mencionado.

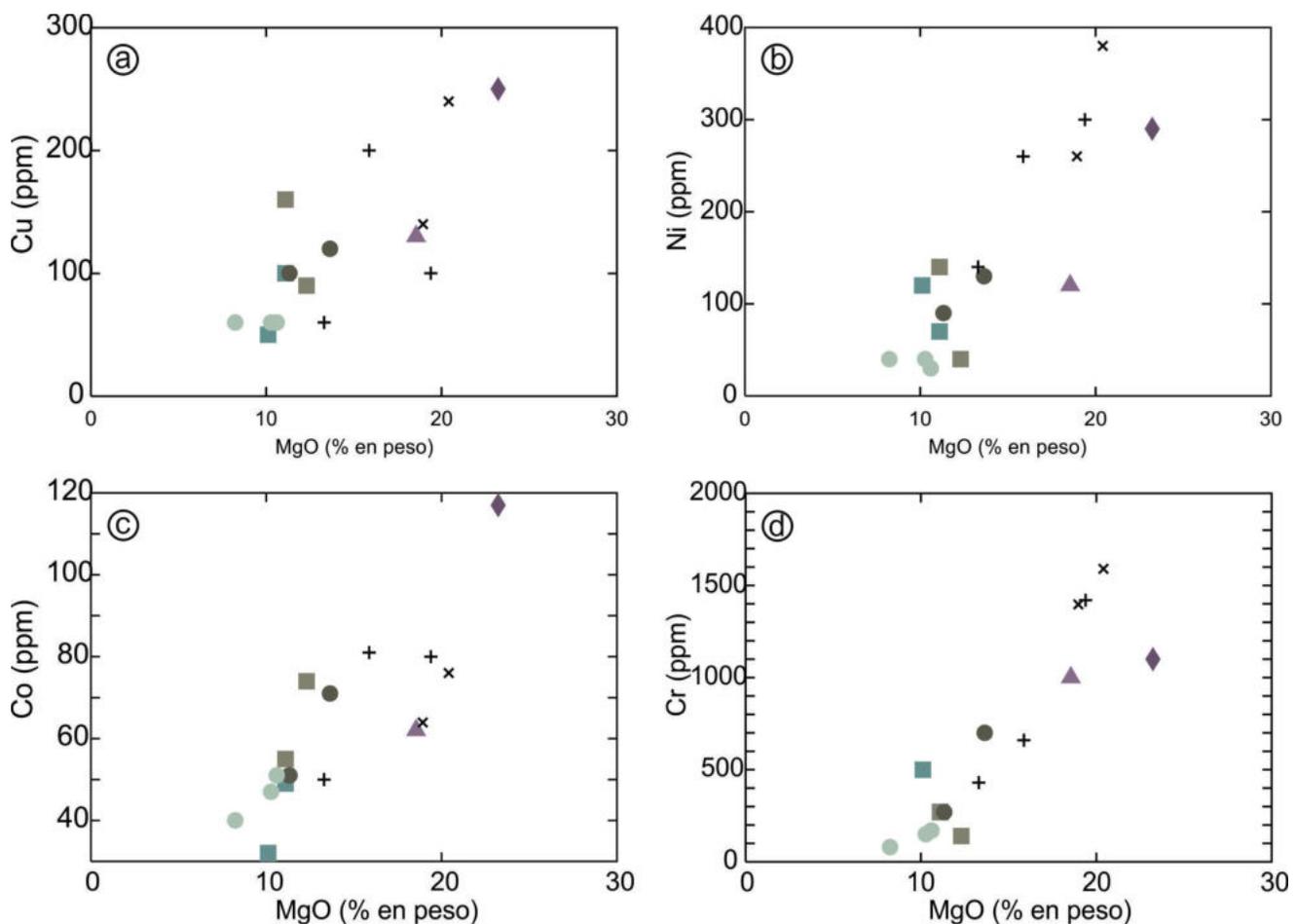
### Elementos traza

En la figura 8 se representan las concentraciones de los elementos traza compatibles Cu, Ni, Co, Cr *versus* MgO. En la misma es posible observar que las muestras de las diferentes unidades exhiben una correlación positiva respecto al MgO, con concentraciones que varían entre 50 y 250 ppm en el caso del Cu, entre 30 y 290 ppm para el Ni, entre 32 y 117 ppm de Co, y entre 80 y 1100 ppm de Cr (Cuadro 3). Por otra parte, las concentraciones de los elementos traza incompatibles Y, Zr, Nb, Hf, Ta y Eu, no evidencian una correlación definida con el MgO (Fig. 9). Las concentraciones de estos elementos varían entre

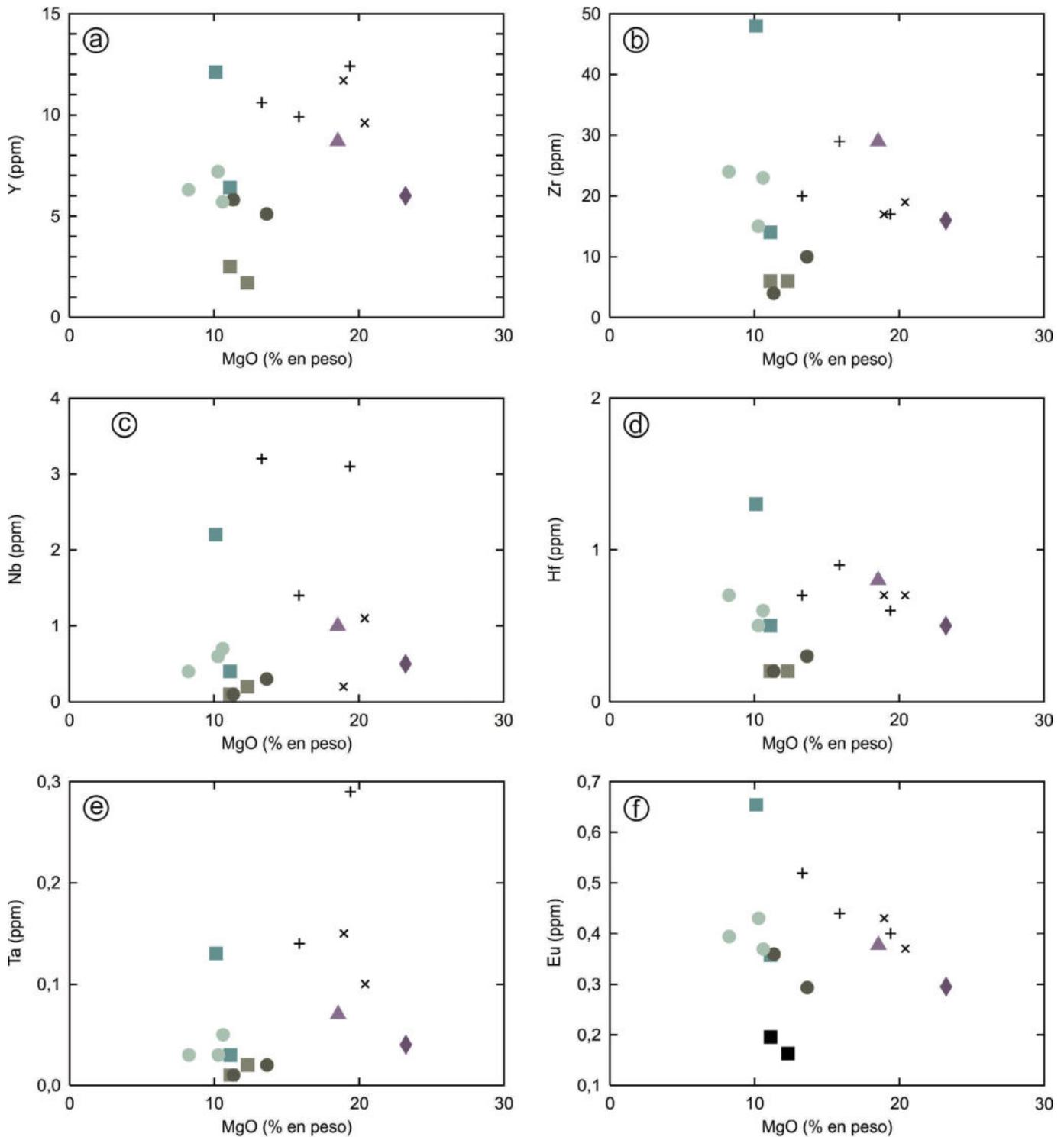
1,7 y 12,1 ppm de Y, entre 4 y 48 ppm de Zr, entre 0,1 y 2,2 ppm de Nb, entre 0,2 y 1,3 ppm de Hf, entre 0,01 y 0,13 ppm de Ta, y entre 0,16 y 0,65 ppm de Eu (Cuadro 3).

En el diagrama de elementos de las tierras raras (ETR) normalizado a condrito (Sun y McDonough 1989) se observa que la totalidad de las muestras estudiadas se encuentran, en términos generales, enriquecidas (Fig. 10a-c), aunque con variaciones en el grado de enriquecimiento en elementos de las tierras raras livianas (ETRL) respecto de los elementos de las tierras raras pesadas (ETRP) (representado por el valor de la relación  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ ). Otra característica de las muestras estudiadas es la oscilación del valor de la anomalía de Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N/\sqrt{(\text{Sm}_N \cdot \text{Gd}_N)}$ ), según la unidad de la cual provengan las rocas analizadas (véase Cuadro 3).

Las muestras correspondientes a las unidades ultramáficas hornblendítica piroxé-



**Figura 8.** Diagramas de elementos traza compatibles *versus* MgO en roca total a) Cu vs. MgO b) Ni vs. MgO c) Co vs. MgO d) Cr vs. MgO. Símbolos indicados en la figura 7 y abreviaturas en la figura 1



**Figura 9.** Diagramas de elementos traza incompatibles versus MgO en roca total a) Y vs. MgO b) Zr vs. MgO c) Nb vs. MgO d) Hf vs. MgO e) Ta vs. MgO; f) Eu vs. MgO. Simbología indicada en la figura 7 y abreviaturas en la figura 1.

nica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendifera con plagioclasa (Fig. 10a) presentan un grado de enriquecimiento en ETR que varía entre 9 y 13 veces respecto al condrito, poseen una relación  $La_N/Yb_N$  variable entre 3,51 y 4,44, y leves anoma-

lías negativas de Eu, con valores de  $Eu/Eu^*$  que varían entre 0,71 y 0,93. En lo que respecta a las rocas máficas, las unidades norítica hornblendifera inferior y norítica hornblendifera superior presentan diferentes características. Las

muestras del miembro-a de la unidad norítica hornblendifera inferior presentan un enriquecimiento variable entre 7 y 19 veces el condrito, exhiben una relación  $La_N/Yb_N$  variable entre 2,89 y 4,06, y un valor de  $Eu/Eu^*$  variable entre 0,95 y 1,03 (Fig.

10b). En las muestras del miembro-b de la unidad norítica hornblendífera inferior, el valor de enriquecimiento oscila entre 2 y 3 veces el condrito, la relación  $La_N/Yb_N$  varía entre 2,46 y 2,59 y se aprecian marcadas anomalías positivas de Eu, con valores de  $Eu/Eu^*$  que varían entre 1,59 y 2,17 (Fig. 10b). Por otra parte, el miembro-a de la unidad norítica hornblendífera superior presenta patrones de ETR enriquecidos entre 4 y 6 respecto al condrito, con valores de relación  $La_N/Yb_N$  que varían entre 1,16 y 1,99; y leves anomalías positivas de Eu, con valores de  $Eu/Eu^*$  variables entre 1,11 y 1,37 (Fig. 10c). En tanto, el miembro-b de la unidad norítica hornblendífera superior evidencia un valor de enriquecimiento respecto al condrito entre 9 y 12, una relación  $La_N/Yb_N$  entre 4,00 y 4,73; y una relación  $Eu/Eu^*$  entre 0,89 y 1,13 (Fig. 10c).

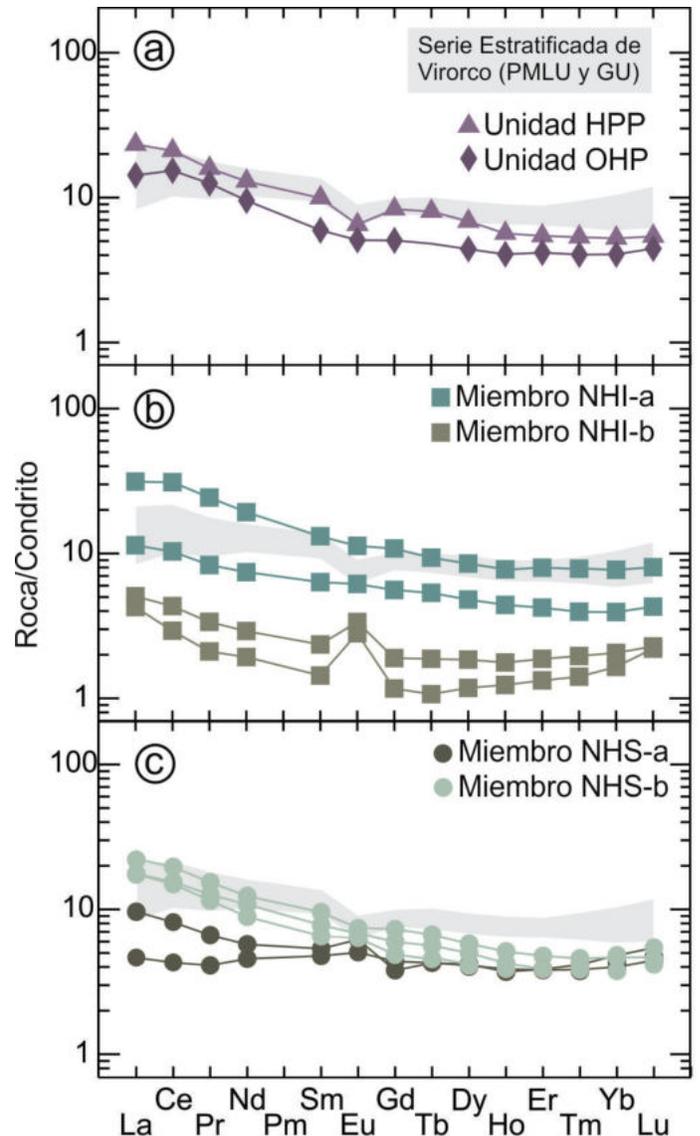
En el diagrama de multielementos normalizado a condrito (Sun y McDonough 1989) de la figura 11 se observa que las rocas de las diferentes unidades exhiben patrones de distribución similares. La mayoría de las muestras presentan patrones planos o levemente enriquecidos en elementos litófilos de alto radio iónico (LILE, *large-ion lithophile elements*) con respecto a los elementos de alto potencial iónico (HFSE, *high field strength elements*), anomalías positivas de Sr y fuertes anomalías negativas de Nb y Ta y anomalías negativas menos marcadas de Hf, Zr y Ti. Algunas diferencias observadas corresponden al miembro-a de la unidad norítica hornblendífera inferior, cuyas muestras evidencian un menor grado de enriquecimiento respecto del condrito y carecen de valores anómalos de Ti; y a las muestras HPP06 (unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa) y OHP45 (unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa), correspondientes a rocas ultramáficas, las cuales presentan anomalías negativas de Sr.

## DISCUSIÓN

### Consideraciones petrográficas

Los estudios petrográficos permiten definir en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas la presencia de cuatro unidades estratigráficas, dos de composición ultramáfica, denominadas unidad hornblendítica pi-

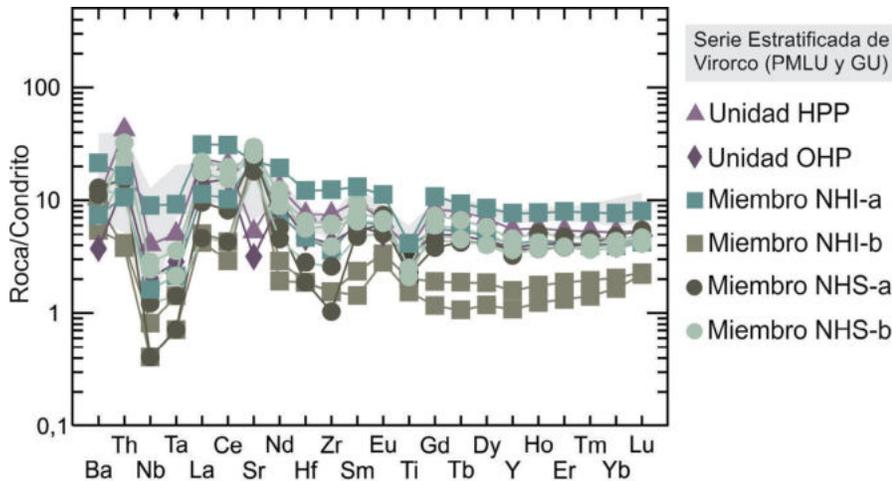
**Figura 10.** Diagrama de elementos de tierras raras en roca total normalizados a condrito (Sun y McDonough 1989) a) Rocas ultramáficas representativas de las unidades hornblendítica piroxénica con plagioclasa (HPP) y ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa (OHP) b) Rocas máficas representativas de los miembros a y b de la unidad norítica hornblendífera inferior (NHI-a y NHI-b, respectivamente) c) Rocas máficas representativas de los miembros a y b de la unidad norítica hornblendífera superior (NHS-a y NHS-b, respectivamente). PLMU: unidad piroxenítica macro-estratificada y GU: unidad Gabroica, ambas del cuerpo intrusivo de Virorco (Ferracutti *et al.* 2017).



roxénica con plagioclasa y unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, y dos de composición máfica, denominada unidad norítica hornblendífera inferior y unidad norítica hornblendífera superior. Estas unidades están constituidas por rocas de textura inequigranular xenomórfica con tamaño de grano fino a medio y una paragénesis mineral dominada principalmente por hornblenda y ortopiroxeno, en el caso de las unidades ultramáficas, y por plagioclasa, hornblenda y ortopiroxeno en el caso de las rocas máficas, siendo la proporción de clinopiroxeno muy escasa en todas las unidades.

En base al análisis microscópico, es posible determinar que los cristales de ortopiroxeno, plagioclasa y clinopiroxeno son de tipo cumulares (cristales en contacto

formados en un estadio primario por procesos de cristalización fraccionada-Wager 1960, Irvine 1982), mientras que la hornblenda representaría el material poscumular (cristales de generación más tardía que habrían cristalizado a partir de un líquido intercumular-Irvine 1982). Estos minerales poscumulares tienden a ser de tipo poiquiliticos y comúnmente forman grandes oikocristales con numerosas inclusiones de cristales cumulares (chadocristales). Utilizando las terminologías propias de las rocas cumulares mencionadas anteriormente, es posible indicar que las rocas estudiadas del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas presentan una textura de tipo ortocumular, dado que el porcentaje de material intercumular varía entre 25 y 50 %. Según Tegner *et al.* (2009), este arreglo



**Figura 11.** Diagrama de multielementos en roca total normalizados a condrito (Sun y McDonough 1989). PMLU: unidad piroxenítica macro-estratificada y GU: unidad gabroica, ambas del cuerpo intrusivo de Virorco (Ferracutti *et al.* 2017). Otras abreviaturas son equivalentes a los de la figura 1.

textural indica que el líquido no fue expelido hacia niveles superiores de la cámara magmática debido a una baja tasa de compactación, la cual es frecuentemente registrada en las porciones superiores de la Serie Estratificada.

Otra característica de relevancia en estas rocas, es la presencia de oikocristales de hornblenda con chadocristales de plagioclasa y ortopiroxeno, los cuales fueron reconocidos principalmente en las unidades hornblendítica piroxenítica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, y los miembros-a y b de la unidad norítica hornblendífera inferior. Esto refuerza la idea de que la hornblenda es una fase tardía, la cual cristalizó en los espacios intersticiales a partir de un líquido intercumular. Según Castro Dorado (2015), la cristalización de oikocristales es frecuente en las etapas finales de la consolidación magmática, motivo por el cual su presencia constituiría otra evidencia que permite vincular estas rocas a niveles superiores de la cámara magmática.

Además de lo expuesto anteriormente, características tales como una estratificación poco conspicua y con bordes difusos, con lineaciones escasas o ausentes, como las observadas en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, fueron descritas por McBirney (1989) en la zona superior de la Serie Estratificada de Skaergaard. Más recientemente, Boudreau y McBirney (1997) indicaron que dichas características estarían vinculadas a mecanismos operantes durante la cristalización magmática pro-

prios de la zona mencionada (estos mecanismos se describen de manera detallada más abajo).

Si bien la textura de tipo ortocumular y la presencia de oikocristales no son rasgos exclusivos de la serie estratificada, dado que fueron reportados por Ferracutti *et al.* (2011, 2017) en la serie de borde marginal del cuerpo intrusivo Virorco, la ausencia en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, de características propias de la serie de borde marginal, tales como texturas de tipo crescumulares y coliformes, y pegmatitas máficas, indicadas como diagnósticas por Wager y Brown (1968), McBirney y Noyes (1979), McBirney (1996) y Namur *et al.* (2013) en el cuerpo intrusivo Skaergaard y reportadas por Ferracutti *et al.* (2011, 2017) en Virorco, refuerza la idea de que las unidades hornblendítica piroxenítica con plagioclasa, ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, norítica hornblendífera inferior y norítica hornblendífera superior representarían la porción superior de la serie estratificada. Asimismo en la intrusión Escuela Las Pircas no se reconocieron rasgos que permitan asociar las unidades que lo conforman a la serie de borde superior. Según lo reportado por Naslund (1984) para el cuerpo intrusivo de Skaergaard, sería esperable reconocer en la serie de borde superior características tales como la presencia de *wavyroxene* (piroxeno ondulado), pegmatitas gabroideas, xenolitos aislados de la roca de caja, xenolitos picríticos y una marcada estratificación, todas ellas

ausentes en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas.

La similitud entre las características petrográficas macro y microscópicas descritas en las unidades que componen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y las presentadas por las rocas que conforman la zona superior de la serie estratificada de intrusiones estratificadas de relevancia mundial, tal como es el caso de Skaergaard, permiten inferir que las unidades que componen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas habrían cristalizado en la porción superior de la serie estratificada.

### Consideraciones geoquímicas

En conformidad con lo propuesto por Brogioni (2001), Ferracutti (2005), Ferracutti *et al.* (2013, 2017) y Cacace *et al.* (2016), para los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos de la zona de estudio, las tendencias observadas en los diagramas de química mineral de elementos mayoritarios y en los diagramas geoquímicos de roca total de elementos mayoritarios y de elementos traza compatibles (Figs. 6, 7 y 8), sugieren que las diferentes unidades que constituyen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas corresponderían a una misma secuencia magmática, la cual habría evolucionado por cristalización fraccionada. Las correlaciones negativas entre  $FeO_{total}$  y  $MgO$  en los cristales de hornblenda y ortopiroxeno (Fig. 6a, b) son consistentes con un incremento en  $FeO_{total}$  y una disminución en el contenido de  $MgO$  en los cristales de hornblenda y ortopiroxeno. En lo que respecta a la geoquímica de roca total, la correlación positiva entre  $SiO_2$  y  $MgO$  (Fig. 7a), y entre  $FeO_{total}$  y  $MgO$  (Fig. 7b) es consistente con el fraccionamiento de ortopiroxeno (enstatita) y hornblenda (Mg-hornblenda), mientras que las correlaciones negativas entre  $Al_2O_3$  y  $MgO$  (Fig. 7c), y  $CaO$  y  $MgO$  (Fig. 7d) estarían vinculadas al incremento de las proporciones modales de plagioclasa en las rocas más evolucionadas. Asimismo, cabe mencionar que el rango de valores evidenciado por la relación  $CaO/Al_2O_3$ , comprendido principalmente entre 0,55 y 0,84, es coherente con el fraccionamiento de hornblenda y plagioclasa anortítica, y con un escaso o nulo fraccionamiento de clinopiroxeno.

En cuanto a los elementos traza compati-

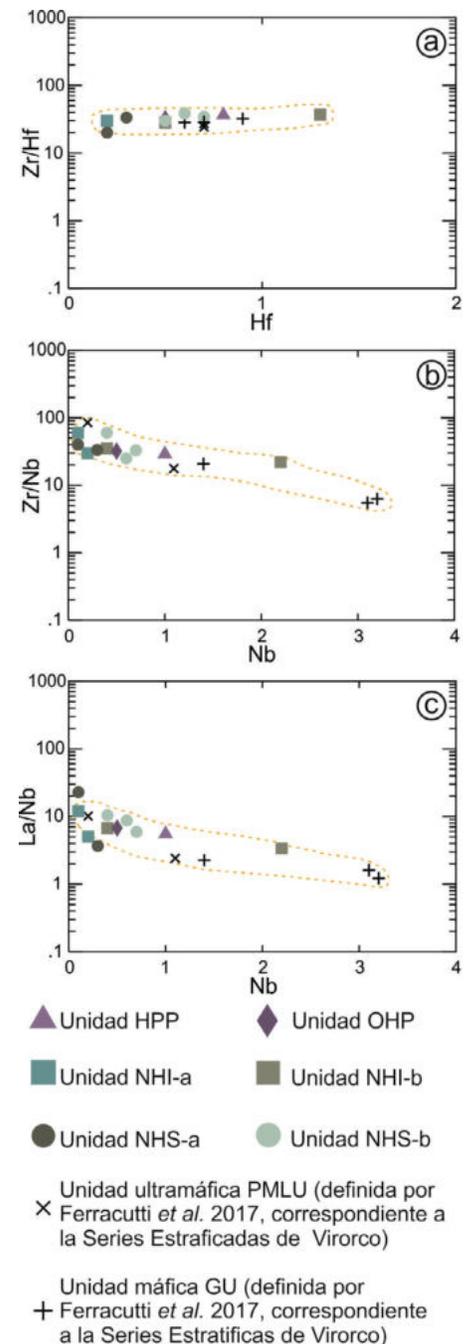
bles, las correlaciones positivas entre Cu, Ni, Co y Cr *versus* MgO (Fig. 8a, b, c, d) podrían vincularse al fraccionamiento de fases minerales opacas capaces de incorporar elevadas concentraciones en dichos elementos en su estructura cristalina. Sin embargo, estas fases fueron reconocidas en proporciones accesorias en las diferentes unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, lo que sugiere que el fraccionamiento de ortopiroxeno y hornblenda también podría haber influenciado dicha tendencia.

En el caso de los elementos traza incompatibles, los diagramas de binarios Y, Zr, Nb, Hf, Ta y Eu *versus* MgO (Fig. 9), no evidencian correlaciones definidas. Esta alta variabilidad en el contenido de los elementos traza también fue observada por McBirney (2002) en el depósito de Skaergaard, quien estableció que las intrusiones estratificadas presentan una distribución irregular en el contenido de elementos traza incompatibles, contraria a la observada para los contenidos de elementos mayoritarios y elementos traza compatibles. A pesar de esto, autores como Winchester y Floyd (1977), Pearce y Norry (1979) y Wood *et al.* (1979), señalan que relaciones relativamente constantes entre diferentes elementos traza incompatibles son características de suites de rocas genéticamente relacionadas. Así, las relaciones relativamente constantes entre diferentes elementos traza incompatibles, tales como Zr/Hf, Zr/Nb y La/Nb (Fig. 12) sugiere que las rocas analizadas corresponderían a una secuencia de rocas genéticamente relacionadas.

Con respecto a los ETR, las similitudes entre los patrones de distribución de las distintas unidades que componen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas presentadas en la figura 10, refuerzan la hipótesis de que estas unidades corresponderían a distintos niveles estratigráficos de una misma secuencia magmática. Si bien es posible reconocer que dichos patrones presentan variaciones en el grado de enriquecimiento, la escasa o nula proporción de clinopiroxeno en las muestras estudiadas junto con la correlación observada en el diagrama de  $\Sigma$ ETR *versus* proporción modal de hornblenda (Fig. 13a) permite establecer que las variaciones en el grado de enriquecimiento en ETR respecto

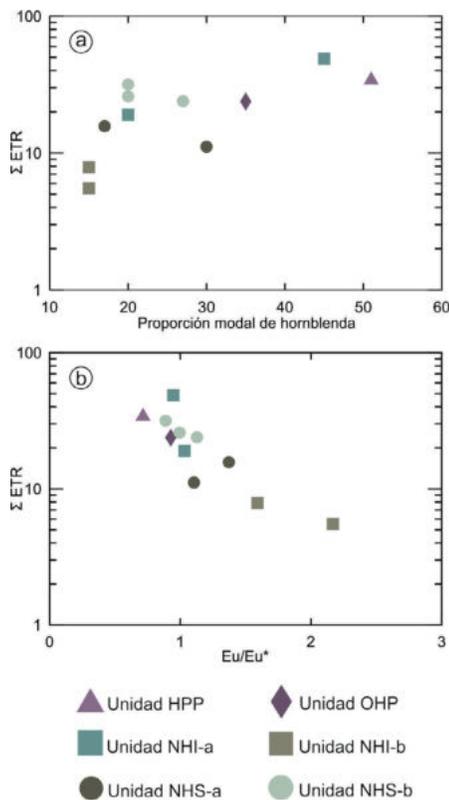
al condrito son consistentes con las variaciones en las proporciones modales de hornblenda de las distintas unidades que componen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas. Esta vinculación entre el contenido de hornblenda y el grado de enriquecimiento en ETR es evidenciada en mayor medida por el miembro-b de la unidad Norítica Hornblendífera Inferior, el cual está compuesto por rocas con proporciones de hornblenda inferiores a los miembros y unidades restantes que componen la intrusión estudiada (Fig. 10). Por otra parte, el diagrama  $\Sigma$ ETR *versus* Eu/Eu\* (Fig. 13b) evidencia que las diferencias en los valores de Eu/Eu\* están controladas por la variación en el grado de enriquecimiento de los ETR restantes, y no por diferencias significativas en la concentración de Eu en las distintas unidades (la diferencia máxima en las unidades que componen el intrusivo Escuelas Las Pircas es de 0,27 ppm). Esto es constatado por el hecho de que las muestras con menor proporción de hornblenda, las cuales por tanto son las que presentan menores valores para la  $\Sigma$ ETR y una relación modal opx/hbl superior a 1, son las que presentan los valores más elevados para la relación Eu/Eu\*.

Por otra parte, cabe mencionar que en el diagrama multielementos normalizado a condrito (Sun y McDonough 1989), es posible observar que las rocas analizadas del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas evidencian anomalías negativas de Nb, Ti, Zr y Hf (Fig. 11). Según Kelemen (1993) y Weaver y Tarney (1984), las anomalías negativas de Nb son características de magmas relacionados a zonas de subducción y a corteza continental mientras que Weaver y Tarney (1984), indican que las anomalías negativas de Ti serían indicadores de rocas generadas en zonas asociadas a subducción. Asimismo, Gill (1976), sugiere que las anomalías negativas de Ti, Zr y Hf son propias de las rocas basálticas originadas en cuencas de retroarco. Estas evidencias geoquímicas que permiten vincular la génesis del cuerpo estudiado a un ambiente de retroarco son consistentes con lo propuesto por autores como Ramos (1988), Brogioni (1994), Brogioni y Ribot (1994), Malvicini y Brogioni (1996), Sims *et al.* (1998), Hauzenberger *et al.* (2001), Chernicoff y Ramos (2003), Delpino *et al.* (2007),



**Figura 12.** Diagramas bivariantes de elementos traza incompatibles en roca total a) Zr/Hf vs. Hf b) Zr/Nb vs. Nb c) La/Nb vs. Nb. PMLU: unidad piroxenítica macro-estratificada y GU: unidad gabroica, ambas del cuerpo intrusivo de Vitorco (Ferracutti *et al.* 2017). Otras abreviaturas son equivalentes a los de la figura 1.

Steenken *et al.* (2008), Zaffarana *et al.* (2011) y Ferracutti *et al.* (2017), quienes indican que los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos del Complejo metamórfico Pringles se habrían originado en un ambiente tectónico de retroarco o en una cuenca marginal de retroarco.



**Figura 13.** Diagramas de correlación entre variables geoquímicas-petrográficas y geoquímicas-geoquímicas a)  $\Sigma\text{ETR}$  vs. proporción modal de hornblenda b)  $\Sigma\text{ETR}$  vs.  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ . Las abreviaturas son equivalentes a los de la figura 1.

## Relación entre los cuerpos intrusivos Escuela Las Pircas y Virorco

Tal como se indicó anteriormente, Brogioni (2001), Ferracutti (2005), Ferracutti *et al.* (2013, 2017) y Cacace *et al.* (2016) señalan que los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos aflorantes en la porción sur de la faja La Jovita-Las Águilas son parte de una misma secuencia magmática.

Ferracutti *et al.* (2017) indican que las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Virorco forman parte de una serie estratificada y están constituidas por una asociación mineralógica compuesta principalmente por ortopiroxeno, clinopiroxeno, Mg-hornblenda y plagioclasa. Si bien esta asociación mineralógica es similar a la descrita para las unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, cabe mencionar que estas intrusiones evidencian marcadas diferencias en las proporciones modales de clinopiroxeno. En el caso del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, el conteni-

do de clinopiroxeno es inferior o igual al 4 %, mientras que las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica presentan proporciones modales que varían entre 35 y 40 %, y entre 10 y 35 %, respectivamente. Esto se ve reflejado en los valores de la relación  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , los cuales se encuentran comprendidos principalmente entre 0,55 y 0,84 en las rocas del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, y entre 0,6 y 2,64 en las rocas provenientes de las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Virorco.

En lo que respecta a los rasgos texturales, al igual que en las unidades hornblendítica piroxénica con plagioclasa y ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa y los miembros-a y b de la unidad norítica hornblendífera inferior del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, Ferracutti *et al.* (2017) indicaron que las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica contienen grandes oikocristales de hornblenda. Sin embargo, cabe destacar que las unidades mencionadas de Virorco presentan rasgos de estratificación más conspicuos que los observados en Escuela Las Pircas.

Así, las similitudes mineralógicas y texturales identificadas en el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Virorco, junto con los diagramas binarios de elementos mayoritarios y elementos traza compatibles *versus* MgO, en los que se representan las concentraciones de dichos elementos en las rocas de Escuela Las Pircas y las unidades de Virorco (Figs. 7 y 8), sugieren que ambos cuerpos corresponderían a una misma secuencia magmática, en la cual Escuela Las Pircas representaría un mayor grado de evolución. Asimismo, las relaciones relativamente constantes que pueden observarse en los diagramas Zr/Hf vs Hf, Zr/Nb vs Nb, y La/Nb vs Nb (Fig. 12), reafirman lo señalado por Brogioni (2001), Ferracutti (2005), Ferracutti *et al.* (2013, 2017) y Cacace *et al.* (2016) respecto a la vinculación genética de las intrusiones máficas-ultramáficas aflorantes en el sector sur de la faja La Jovita-Las Águilas. Por otra parte, la comparación entre los patrones de distribución de ETR de las diferentes unidades de Escuela Las Pircas y de las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica (Fig.10) de Virorco,

evidencia un mayor enriquecimiento en los elementos de las tierras raras medias (ETRM) y pesados (ETRP) en las rocas provenientes de Virorco respecto a las correspondientes al cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas. Estas diferencias son consistentes con las proporciones más elevadas de minerales capaces de fraccionar ETRM y ETRP, tales como clinopiroxeno y hornblenda, en las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica.

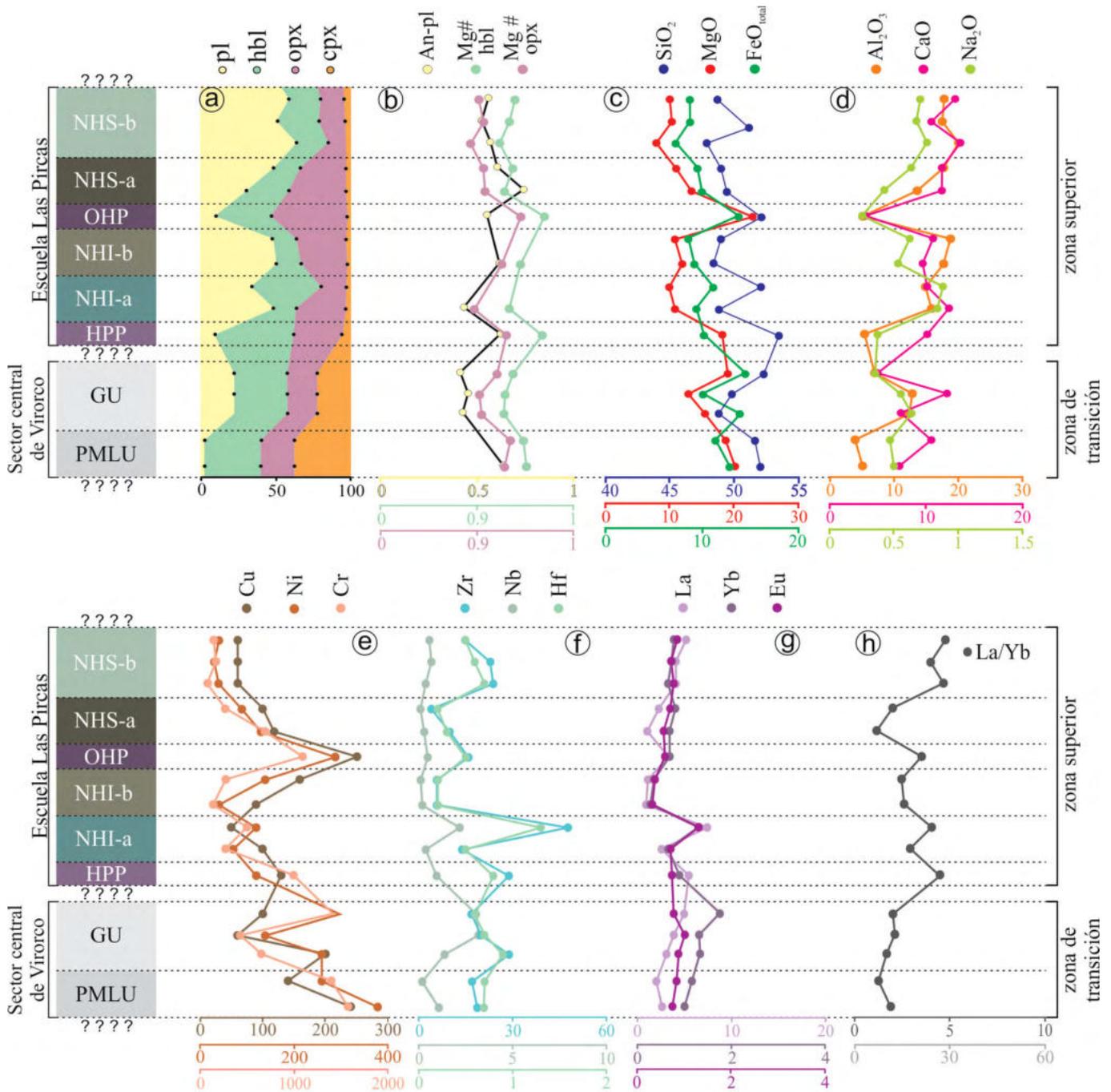
En base a las similitudes petrográficas (asociación mineralógica), texturales (presencia de oikocristales) y geoquímicas detalladas previamente, es posible inferir que las unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Virorco, todas ellas perteneciente a la serie estratificada, conformarían parte de una misma secuencia estratigráfica ígnea, en la cual es posible identificar dos zonas diferentes: la zona de transición y la zona superior. La zona de transición (más primitiva, y denominada de esta manera por ser la zona ubicada entre la zona superior y la porción no aflorante de la serie estratificada) está conformada por las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica (Virorco) y contiene elevadas proporciones modales de clinopiroxeno. En tanto, la zona superior (más evolucionada) está representada, de base a tope, por las unidades hornblendítica piroxénica con plagioclasa, norítica hornblendífera inferior, ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa y norítica hornblendífera superior del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y se caracteriza por la escasa o nula proporción de clinopiroxeno (Fig. 14a).

Además de las diferencias en el contenido de clinopiroxeno a lo largo de la secuencia estudiada (conformada por las unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y por las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Virorco), cabe mencionar que las proporciones modales de ortopiroxeno, hornblenda y plagioclasa también son variables a lo largo de la misma. La proporción modal de plagioclasa se incrementa fuertemente desde la base al tope de la secuencia, mientras que la proporción modal de hornblenda presenta una leve disminución y el contenido de ortopiroxeno permanece relativamente constante (Fig. 14a).

Dentro de esta secuencia estratigráfica ígnea, las variaciones en la química mineral evidencian una disminución del #Mg en el ortopiroxeno y en la hornblenda hacia el tope de la secuencia, mientras que la proporción de anortita (% An) en plagioclasa

es variable y no evidencia una tendencia definida (Fig. 14b). En lo que respecta a la química de roca total, las concentraciones de los elementos mayoritarios  $\text{SiO}_2$ , MgO y  $\text{FeO}_{\text{total}}$  evidencian una leve disminución desde la base al tope de la secuencia

(Fig. 14c), mientras que los elementos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO y  $\text{Na}_2\text{O}$  evidencian un marcado incremento en su concentración hacia el tope de la misma (Fig. 14d). Por otra parte, los contenidos de elementos traza compatibles Cu, Ni y Cr evidencian una



**Figura 14.** Variaciones mineralógicas y geoquímicas de la secuencia estratigráfica ígnea conformada por las unidades piroxenítica macro-estratificada (PMLU) y gabroica (GU) del cuerpo intrusivo Virocco (Ferracutti et al. 2017), y las unidades hornblendítica piroxenítica con plagioclasa (HPP), norítica hornblendífera inferior (NHI), ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa (OHP) y norítica hornblendífera superior (NHS) del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas a) Variaciones en las proporciones modales de plagioclasa, hornblenda, ortopiroxeno y clinopiroxeno b) Variaciones de los contenidos de anortita en plagioclasa, y del número de magnesio en hornblenda y ortopiroxeno c-d) Variaciones en las concentraciones de elementos mayoritarios en roca total e) Variaciones en las concentraciones de los elementos traza compatibles Cu-Ni-Cr en roca total f) Variaciones en las concentraciones de los elementos traza incompatibles Zr-Nb-Hf en roca total g) Variaciones en las concentraciones de los elementos de las tierras raras La-Yb-Eu en roca total h) Variaciones de la relación La/Yb en roca total.

clara disminución desde la base al techo de la secuencia (Fig 14e), mientras que las concentraciones de los elementos traza incompatibles Zr, Nb, Hf, y de los ETR La, Yb y Eu no presentan tendencias definidas (Fig. 14f, g). Por último, cabe mencionar que la relación La/Yb muestra un incremento de valores hacia los miembros más evolucionados de la secuencia (Fig. 14h).

### Mecanismos generadores de estratificación ígnea en los cuerpos intrusivos Escuela Las Pircas y Viorco

Las variaciones modales reconocidas en la porción estudiada de la serie estratificada, tales como la fuerte disminución en el contenido de clinopiroxeno en las unidades que constituyen Escuela Las Pircas respecto de las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica de Viorco y las fuertes variaciones en el contenido de hornblenda a lo largo de la secuencia estudiada, así como las variaciones texturales con presencia y ausencia de oicocristales de hornblenda, permiten inferir que las variaciones en la tasas de nucleación y crecimiento cristalino, serían grandes responsables de los cambios petrográficos y geoquímicos observados en esta secuencia estratigráfica. Según Castro Dorado (2015), fuertes variaciones en las tasas de nucleación y crecimiento cristalino podrían deberse a un incremento positivo de la movilidad iónica por difusión, favorecido por el enriquecimiento de agua en el líquido residual, condición que es frecuente en etapas finales de la consolidación magmática.

Por otra parte, Boudreau y McBirney (1997) indicaron que características como una estratificación poco conspicua y con bordes difusos, con lineaciones escasas o ausentes, tal como las evidenciadas por las unidades que componen el cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas, son propias de la porción superior de la serie estratificada y estarían vinculadas a procesos asociados a variaciones en la tasa de nucleación y/o crecimiento cristalino, y no a procesos de compactación y/o procesos dinámicos dentro de la cámara magmática, probablemente indicando que estos últimos ya habrían cesado.

En lo que respecta a la zona de transición

de la secuencia estudiada, las unidades que la conforman (piroxenítica macro-estratificada y gabroica) evidencian una estratificación más marcada (Ferracutti *et al.* 2017) respecto de las unidades que conforman la zona superior (hornblendítica piroxenítica con plagioclasa, norítica hornblendífera inferior, ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa y norítica hornblendífera superior). Sin embargo, las unidades de ambas zonas presentan grandes oicocristales de hornblenda y carecen de estructuras de flujo o lineaciones significativas, lo que indicaría que la estratificación reconocida en las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica (Viorco) se debería a una combinación de mecanismos similares a los sugeridos para la formación de las unidades de la zona superior.

Por otra parte, resulta apropiado establecer si mecanismos capaces de modificar la composición del magma primario, tales como recarga de magma (*magma replenishment*) y/o mezcla de magmas (*magma mixing*) tuvieron influencia o no en la cristalización de la secuencia estratigráfica estudiada. Respecto a esto, Naslund y McBirney (1996) indican que las inyecciones de magma primitivo en cuerpos magmáticos máficos-ultramáficos constituyen un mecanismo viable para la formación de niveles composicionalmente estratificados. Asimismo, numerosos autores, tales como Irvine y Smith (1967), Jackson (1970), Campbell (1977) y Dunham y Wadsworth (1978), atribuyen la formación de unidades con estratificación de tipo cíclica, reconocida en depósitos de tipo estratificados como Muskox, Stillwater, Great Dyke, Bushveld y Rum, a repetidos influjos de magma primitivo en la cámara magmática, donde la base de cada uno de estos ciclos define un cambio abrupto hacia composiciones minerales y químicas más primitivas (con mayor #Mg) (Huppert y Sparks 1980). Por otra parte, Brandeis (1992) sugiere que la cantidad de magma necesaria para dar lugar a los cambios composicionales que demandan dichos ciclos es demasiado grande como para ser hospedada dentro de los depósitos mencionados.

Teniendo en cuenta lo indicado anteriormente, cabe resaltar que las tendencias mineralógicas y geoquímicas, tanto en

minerales como en roca total, no sufren desplazamientos significativos hacia composiciones minerales y químicas más primitivas a lo largo de la secuencia estudiada (Fig. 14). Por lo tanto, dichas tendencias son inconsistentes con procesos como recarga de magma y/o mezcla de magmas.

Otro mecanismo íntimamente vinculado a la recarga de magma, capaz de generar cambios composicionales bruscos en los diferentes niveles estratificados, es la mezcla de magmas (Naslund y McBirney 1996). Respecto a este mecanismo, Turner y Campbell (1986) consideran que si un magma primitivo es inyectado en la base de un cuerpo magmático composicionalmente estratificado, el proceso de mezcla estaría limitado únicamente a las porciones inferiores de la cámara magmática, lo cual no sería válido en el caso de la secuencia estudiada, conformada por las unidades del cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas y las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica del cuerpo intrusivo Viorco, ya que las mismas constituirían la porción superior de la serie estratificada.

Según Namur *et al.* (2010), procesos como los mencionados anteriormente, capaces de generar cambios en la composición de un cuerpo magmático máfico-ultramáfico y estratificaciones composicionales en la cámara magmática, son frecuentes en las intrusiones de tipo estratificadas de gran tamaño, como por ejemplo Bushveld (455000-585000 km<sup>3</sup>, Davies y Cawthorn 1984, Walraven *et al.* 1990), mientras que en cuerpos magmáticos de menor tamaño, como es el caso de Skaergaard (270-450 km<sup>3</sup>, Hoover 1989, McBirney 1996, Nielsen 2004), la estratificación sería generada por una diferenciación a partir de un único *batch* de magma. Por lo tanto, lo expuesto por Kostadinoff *et al.* (1998a, b), quienes sugieren que los cuerpos máficos-ultramáficos situados en el sector sur de la faja La Jovita-Las Águilas (Escuela Las Pircas, El Fierro, Viorco, Las Higueras y Las Águilas) serían parte de una misma intrusión de 800 km<sup>3</sup>, es consistente con el rango de dimensiones en el cual, según Namur *et al.* (2010), las intrusiones de tipo estratificadas no serían influenciadas por procesos como la recarga y/o mezcla de magmas.

## CONCLUSIONES

El cuerpo intrusivo Escuela Las Pircas es un cuerpo máfico-ultramáfico compuesto por cuatro unidades estratigráficas: unidad hornblendítica piroxénica con plagioclasa, unidad ortopiroxenítica hornblendífera con plagioclasa, unidad norítica hornblendífera inferior y unidad norítica hornblendífera superior; las cuales conforman parte de la porción superior de la serie estratificada. Las unidades definidas en Escuela Las Pircas y las unidades piroxenítica macro-estratificada y gabroica, correspondientes a la Serie Estratificada del cuerpo intrusivo Virorco, corresponderían a una misma secuencia magmática, donde las unidades de Escuela Las Pircas representarían el mayor grado de evolución.

Las variaciones en las proporciones modales, en la química mineral y en la química de roca total, observadas a lo largo de esta secuencia estratigráfica ígnea, evidencian que la misma presenta una estratificación de tipo modal y criptica.

Las observaciones macro y microscópicas, petrográficas y texturales, sugieren que dicha estratificación habría sido generada principalmente por variaciones en las tasas de nucleación y crecimiento, mientras que la influencia de mecanismos como la compactación y/o la convección magmática habría sido escasa o nula.

Si bien en este trabajo no se realizan modelados isotópicos que permitan establecer con certeza si mecanismos tales como la recarga y/o mezcla de magmas tuvieron influencia en la génesis de la estratificación modal y criptica, cabe destacar que las variaciones de química mineral y de roca total reconocidas a lo largo de la secuencia no son consistentes con dichos mecanismos. Asimismo, la dimensión estimada en base a estudios geofísicos para los cuerpos intrusivos máficos-ultramáficos que conforman el sector sur de la faja La Jovita-Las Águilas, es otro de los factores inconsistentes con la influencia de dichos mecanismos en la génesis secuencia estudiada.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con los siguientes proyectos: PICT2014-1721

de la ANPCYT y PGI 24/H148 de la SGCyT-UNS otorgados a G. Ferracutti, y PGI 24/H131 de la SGCyT-UNS y PIP 112-201101-00285/12 del CONICET, otorgados a E. A. Bjerg. Los autores agradecen las observaciones, comentarios y sugerencias de la Dra. Florencia L. Boedo y de otro árbitro anónimo.

## REFERENCIAS

- Boudreau, A. y McBirney, A. 1997. The Skae-gaard Layered Series. Part III. Non-dynamic layering. *Journal of Petrology* 38: 1003-1020.
- Brandeis, G. 1992. Constraints on the formation of cyclic units in ultramafic zones of large basaltic chambers. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 112: 312-28.
- Brogioni, N. 1994. Petrología de la faja de rocas máficas y ultramáficas de la Sierra de San Luis, Argentina. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 967-971, Concepción.
- Brogioni, N. 2001. Petrología de los cuerpos Virorco y El Fierro, faja máfica-ultramáfica del borde oriental de la sierra de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 535-547.
- 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.
- Campbell, I. 1977. A study of macro-rhythmic layering and cumulate processes in the Kimberlana intrusion, western Australia. Part 1: The Upper Layered Series. *Journal of Petrology* 18: 185-215.
- Cacace, F., Fernandez Ihigo, C., Ferracutti, G. y Bjerg, E.A. 2016. Petrografía y geoquímica del cuerpo ígneo El Renegado, Sierra Grande de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73: 242-255.
- Castro Dorado, A. 2015. Petrografía de rocas ígneas y metamórficas, 206 p., Madrid.
- Cawthorn, R.G. 1996. *Layered Intrusions*, 530 p., Amsterdam.
- Chernicoff, C. y Ramos, V. 2003. El basamento de la sierra de San Luis: Nuevas evidencias magnéticas y sus implicancias tectónicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 511-524.
- Davies, G. y Cawthorn, R.G. 1984. Mineralogical data on a multiple intrusion in the Rustenburg Layered Suite of the Bushveld Complex. *Mineralogical Magazine* 48: 469-80.
- Deer, W.A., Howie, R.A. y Zussman, J. 1992. *An Introduction to the rock-forming minerals*, segunda edición, 696 p., New York.
- Delakowitz, B., Höll, R., Hack, M., Brodtkorb, M. K. de y Stärk, H. 1991. Geological and geochemical studies of the Sierra del Morro-Oeste (San Luis Province, Argentina): meta-sediments and meta-volcanics from a probable back-arc setting. *Journal of South American Earth Sciences* 4: 189-200.
- Delpino, S., Dimieri, L., Bjerg, E.A., Kostadinoff, J., Mogessie, A., Hoinkes, G., Hauzenberger, Ch. y Felfernig, A. 2001. Geometric analysis and timing of structures on mafic-ultramafic bodies and high grade metamorphic rocks in the Sierra Grande of San Luis Province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 101-112.
- Delpino, S., Bjerg, E.A., Ferracutti, G. y Mogessie, A. 2007. Counterclockwise tectonometamorphic evolution of the Pringles Metamorphic Complex, Sierras Pampeanas of San Luis (Argentina). *Journal of South American Earth Science* 23: 147-175.
- Dunham, A. y Wadsworth, W. 1978. Cryptic variation in the Rhum layered intrusion. *Mineralogical Magazine* 42: 347-356.
- Evans, D.M., Boadi, I., Byemelwa, L., Gilligan, J., Kabete, J. y Marcet, P. 2000. Kabanga mafic Ni sulfide deposits, Tanzania: morphology and geochemistry of associated intrusions. *Journal of African Earth Sciences* 30: 651-674.
- Felfernig, A., Mogessie, A., Hauzenberger, Ch., Hoinkes, G., Bjerg, E.A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 1997. Petrology and mineralization of the Las Águilas ultramafic body, San Luis province, Argentina. *Terra Nova* 9: 532-533.
- Ferracutti, G. 2005. Geología y mineralizaciones asociadas a la faja de rocas máficas-ultramáficas de la Sierras Pampeanas de San Luis. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur (inérita), 260 p., Bahía Blanca.
- Ferracutti, G. y Bjerg, E.A. 2001. Estudio petrográfico-calcoográfico de las rocas máficas-ultramáficas del yacimiento Las Águilas, Provincia de San Luis, Argentina. 11° Congreso Latinoamericano de Geología y 3° Congreso Uruguayo, CD-ROM, 171, Montevideo.
- Ferracutti, G., Mogessie, A. y Bjerg, E.A. 2006. Chrome spinels from the Las Águilas mafic-ultramafic intrusion, San Luis province, Argentina. *Neues Jahrbuch für Mineralogie* 183: 63-77.
- Ferracutti, G., Bjerg, E.A. y Mogessie, A. 2007. Petrología y geoquímica de las rocas má-

- ficas-ultramáficas del área Río Las Águilas-Arroyo de Los Manantiales, Provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 406-416.
- Ferracutti, G., Bjerg, E.A. y Mogessie, A. 2011. Caracterización del bandeado ígneo en el cuerpo máfico-ultramáfico de Virorco, San Luis. *Actas del 18° Congreso Geológico Argentino Simposio Depósitos minerales en Argentina: modelos y técnicas de exploración 1092-1093*, Neuquén.
- Ferracutti, G., Bjerg, E.A. y Mogessie, A. 2013. Petrology, geochemistry and mineralization of the Las Águilas and Virorco mafic-ultramafic bodies, San Luis Province, Argentina. *International Journal of Earth Sciences* 102: 701-720.
- Ferracutti, G., Bjerg, E.A., Hauzenberger, C., Mogessie, A., Cacace, F. y Asiain, L. 2017. Meso to Neoproterozoic layered mafic-ultramafic rocks from the Virorco back-arc intrusion, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 79: 489-506.
- Gervilla, F., Sabalúa, J., Carrillo, R., Fenoll Hach-Alí, P. y Acevedo, R.D. 1993. Mineralogy and mineral chemistry of the Las Águilas Ni-Cu deposit (province of San Luis, Argentina). 461-464, Universidad de Granada, Granada.
- Gill, J.B. 1976. Comparison and age of Lau Basin and Ridge volcanic rocks: implications for evolution of an interarc basin and remnant arc. *Geological Society of America Bulletin* 87: 1384-1395.
- González Bonorino, F. 1961. Petrología de algunos cuerpos básicos de San Luis y las granulitas asociadas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 19: 135-150.
- Gordillo, C. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Turner, J.C.M. (ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias 1: 577-650, Córdoba.
- Hauzenberger, Ch., Mogessie, A., Hoinkes, G., Felfernig, A., Bjerg, E.A. y Kostadinoff, J. 1996. Granulite facies metamorphism in crystalline basement and ultramafic rocks in the Sierras Pampeanas Range, Province of San Luis, Argentina. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft* 141: 110-111.
- Hauzenberger, Ch., Mogessie, A., Hoinkes, G., Bjerg, E.A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 1997a. Granulite facies metamorphism of the basement of the Sierras de San Luis, Argentina-An Anticlockwise P-T path. *Terra Nova* 9: 678.
- Hauzenberger, Ch., Mogessie, A., Hoinkes, G., Bjerg, E.A., Kostadinoff, J., Delpino, S. y Dimieri, L. 1997b. Platinum group minerals in the basic to ultrabasic complex of the Sierras de San Luis, Argentine. *Mineral Deposits: Research and Exploration-Where do they meet?* A. A. Balkema Publishers, 439-442, Brookfield.
- Hoover, J.D. 1989. Petrology of the Marginal Border Series of the Skaergaard Intrusion. *Journal of Petrology* 30: 399-439.
- Huppert, H.E. y Sparks, R.S. 1980. The Fluid Dynamics of a Basaltic Magma Chamber Replenished by Influx of Hot, Dense Ultrabasic Magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 75: 279-89.
- Irvine, T.N. 1982. Terminology for Layered intrusions. *Journal of Petrology* 23: 127-162.
- Irvine, T.N. y Smith C.H. 1967. The ultramafic rocks of the Muskox intrusion. En *Wyllie, P.J. (ed.) Ultramafic and Related Rocks: 38-49*, New York.
- Jackson, E.D. 1970. The cyclic unit in layered intrusions-a comparison of repetitive stratigraphy in the ultramafic parts of the Stillwater, Muskox, Great Dyke and Bushveld Complexes. *Special publication, Geological Society of South Africa* 1: 391-424.
- Kelemen, P.B., Shimizu, N. y Dunn, T. 1993. Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: partitioning of K, Nb, La and Ce during melt rock reaction in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 120: 111-134.
- Kilmurray, J. y Villar, L. 1981. El basamento de la Sierra de San Luis y su petrología. En: Yrigoyen, M. (ed.), *Geología y recursos naturales de la provincia de San Luis*, 8° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 33-54, San Luis.
- Kostadinoff, J., Bjerg, E.A., Delpino, S., Dimieri, L., Mogessie, A., Hoinkes, G., Hauzenberger, Ch. y Felfernig A. 1998a. Gravimetric and magnetometric anomalies in the Sierras Pampeanas of San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53: 549-552.
- Kostadinoff, J., Bjerg, E.A., Dimieri, L., Delpino, S., Raniolo, A., Mogessie, A., Hoinkes, G., Hauzenberger, Ch., Felfernig, A. 1998b. Anomalías geofísicas en la faja de rocas máficas-ultramáficas de la Sierra Grande de San Luis, Argentina. 4° Reunión de Mineralogía y Metalogenia: 139-146, Bahía Blanca.
- Kostadinoff, J., Delpino, S., Bjerg, E.A., Mogessie, A., Raniolo, A., Arrese, M., y Ferracutti, G. 2005. Prospección geológica y geofísica de sulfuros en el área de Virorco-La Bolsa, provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 559-566.
- Le Maitre, R.W. 2002. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematic of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 236 p., Oxford.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. y Guo, Y. (1997) *Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names*. *Canadian Mineralogist* 35: 219-246.
- Llambías, E.J. y Malvicini, L. 1982. Geología y génesis de los yacimientos de tungsteno de las Sierras del Morro, Los Morrillos y Yulto, provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 37: 100-143.
- Mallimacci, H.S. 1985. Informe de prospección sector rocas básicas, Provincia de San Luis. Informe, Dirección General de Fabricaciones Militares, Centro de Exploración Geológico-Minera (CEGM), (inédito)
- Malvicini, L. y Brogioni, N. 1996. Las Águilas Este Deposit: shear zone hosted hydrothermal Cu-Ni sulfide and platinum-group elements mineralization in the mafic-ultramafic complex of San Luis Range, Argentina. *Geology and Ore Deposits of the American Cordillera Symposium, Proceedings: 1475-1485*, Reno/Sparks.
- McBirney, A. R. 1989. The Skaergaard Layered Series: I. Structure and average compositions. *Journal of Petrology* 30: 363-397.
- McBirney, A.R. 1996. The Skaergaard intrusion. En *Cawthorn, R.G. (ed.) Layered Intrusions: 147-180*, Amsterdam.
- McBirney, A. R. 2002. The Skaergaard Layered Series. Part VI. Excluded elements. *Journal of Petrology* 43: 535-556.
- McBirney, A.R. y Noyes, R.M. 1979. Crystallization and layering in the Skaergaard intrusion. *Journal of Petrology* 20: 487-554.
- Mogessie, A., Hauzenberger, Ch., Hoinkes, G., Felfernig, A., Stumpfl, E.F., Bjerg, E.A. y Kostadinoff, J. 2000. Genesis of platinum-group minerals in the Las Águilas mafic-ultramafic

- rocks, San Luis Province, Argentina: textural, chemical and mineralogical evidence. *Mineralogy and Petrology* 68: 85-114.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. y Gottardi, G. 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine* 52: 535-550.
- Namur, O., Charlier, B., Toplis, M., Higgins, M., Liégeois, J. y Vander Auwera, J. 2010. Crystallization sequence and magma chamber processes in the ferrobaltic Sept Iles layered intrusion, Canada. *Journal of Petrology* 51: 1203-1236.
- Namur, O., Humphreys, M.C.S. y Holness, M.B. 2013. Lateral reactive infiltration in a vertical gabbroic crystal mush, Skaergaard intrusion, East Greenland. *Journal of Petrology* 54: 985-1016.
- Naslund, H.R. 1984. Petrology of the Upper Border Series of the Skaergaard intrusion. *Journal of Petrology* 25: 185-212.
- Naslund, R. y McBirney, A. 1996. Mechanisms of formation of igneous layering. En: Cawthorn, R. (ed.) *Layered Intrusions: 1-43*, Amsterdam.
- Nielsen, T. 2004. The shape and volume of the Skaergaard intrusion, Greenland: Implications for mass balance and bulk composition. *Journal of Petrology* 45: 507-530.
- Ortiz Suárez, A. 1988. El basamento de Las Aguadas, provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, 19: 13-24.
- Ortiz Suárez, A., Prozzi, C. y Llambías, E. 1992. Geología de la parte sur de la Sierra de San Luis y granitoides asociados, Argentina. *Estudios Geológicos (Argentina)* 48: 269-277.
- Pastore, F. y Ruiz Huidobro, O. 1952. Descripción geológica de la Hoja 24g Saladillo, Provincia de San Luis. *Boletín de la Dirección Nacional de Minería* 78: 1-62.
- Pouchou, J. y Pichoir, F. 1991. Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model "PAP". En: Heinrich, K.F.J., Newbury, D.E. (eds.), *Electron Probe Quantitation: 31-75*, Boston.
- Prozzi, C., 1990. Consideraciones acerca del Basamento de San Luis. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 452-455, San Juan.
- Prozzi, C. y Ramos, G. 1988. La Formación San Luis. 1° Jornadas de Trabajo de las Sierras Pampeanas, Abstracts 1 p., San Luis.
- Ramos, V. 1988. Late Proterozoic-early Paleozoic history of South America - a collisional history. *Episodes* 11: 168-174.
- Sabalúa, J. 1986. Yacimiento Las Águilas. Mineralización Ni-Cu-Co, Departamento Pringles, Provincia de San Luis, República Argentina. Informe final, DGFM, Subdirección de Desarrollo Minero, Centro de Exploración Geológico Minero, (inédito) 32 p., Mendoza.
- Sabalúa, J., Chabert, M. y Santamaría, G. 1981. Mineralización de sulfuros de hierro, cobre y níquel, en el cuerpo básico de Las Águilas, Provincia de San Luis. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 497-507, San Luis.
- Sato, A. M., González, P.D. y Llambías, E. 2003. Evolución del orógeno Famatiniano en la Sierra de San Luis: magmatismo de arco, deformación y metamorfismo de bajo a alto grado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 487-504.
- Sims, J., Stuart Smith, P., Lyons, P. y Skirrow, R. 1997. Informe Geológico y Metalogénico de las Sierras de San Luis y Comechingones, provincias de San Luis y Córdoba. *Geológico Minero Argentino, Anales* 28: 1-148, Buenos Aires.
- Sims, J.P., Ireland, T.R., Camacho A., Lyons, P., Pieters, P.E., Skirrow, R.G., Stuart-Smith, P.G. y Miró R. 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar- Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina. Implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin, implications for the Proto-Andean margin of Gondwana, *Geological Society of London, Special Publication* 142: 259-281, London.
- Steenken, A., Siegesmund, S., Wemmer, K., Lopez de Luchi, M.G. 2008. Time constraints on the Famatinian and Achaian structural evolution of the basement of the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina). *Journal of South American Earth Sciences*. 25: 336-358.
- Sun, S. y McDonough, W. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in ocean basin, Geological Society, Special Publication* 42: 313-345, London.
- Szabados, C. 1997. Petrogenesis of trachyandesite and trachyte rocks in the Mórággy hill, South Hungary. *Acta Mineralogica-Petrographica* 38: 37-50.
- Tang, Z.L. 1993. Genetic model of the Jinchuan nickel-copper deposit. *Geological Association of Canada, Special Paper*, 40: 389-401.
- Tegner, C., Thy, P., Holness, M.B., Jakobsen, J.K. y Leshner, C.E. 2009. Differentiation and compaction in the Skaergaard intrusion. *Journal of Petrology* 50: 813-840.
- Turner, J.S., y Campbell, I.H. 1986. Convection and mixing in magma chambers. *Earth-Science Reviews*. 23: 255-352.
- von Gosen, W. y Prozzi, C. 1996. Geology, structure and metamorphism in the area south of La Carolina (Sierras de San Luis, Argentina). 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 301-314, Buenos Aires.
- Wager, L.R. 1960. The major element variation of the Layered Series of the Skaergaard intrusion and a re-estimation of the average composition of the Hidden Layered Series and of the successive residual magmas. *Journal of Petrology* 1: 364-398.
- Wager, L.R. y Deer, W.A. 1939. Geological investigations in East Greenland, Part III. The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuaq, East Greenland. *Meddelelser om Grønland* 105: 352 p.
- Wager, L.R. y Brown, G.M., 1968. *Layered Igneous Rocks*, 588 p., Edimburg.
- Walraven, F., Armstrong, R.A., y Kruger, F.J. 1990. A chronostratigraphic framework for the northcentral Kaapvaal Craton, the Bushveld Complex and Vredefort structure. *Tectonophysics* 171: 23-48.
- Weaver, B.L., Tarney, J. 1984. Major and trace element composition of the continental lithosphere, *Physics and Chemistry of the Earth* 15: 39-68.
- Whitney, D.L. y Evans, W.E. 2010. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Zaffarana, C., Geuna, S., Poma, S. y Patiño Douce, A. 2011. Reassessment of the volume of the Las Águilas mafic-ultramafic intrusive, San Luis, Argentina, based on an alternative geophysical model. *Journal of South American Earth Sciences* 32: 183-195.

Recibido: 10 de agosto, 2018.

Aceptado: 26 de agosto, 2019.