



Geoquímica y petrografía del magmatismo del distrito minero de Marcona y su relación con la mineralización de los depósitos de tipo IOCG-skarn

Marco Contreras¹, Mario Ayte², Dante Sánchez³, Carlos Moreno⁴, y Ronald Risco⁵

¹ macontrerasf@gmail.com

² marioaytel@gmail.com

³ dsanchez@marsa.com.pe

⁴ geologiacarlos@yahoo.es

⁵ Ronald_724@hotmail.com

1. Introducción

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la franja metalogenética de depósitos Fe-Cu-Au, de tipo IOCG-skarn, del Jurásico-Cretácico de la costa sur del Perú (Ica-Arequipa), a 60 km al sur de la ciudad de Nasca. Geológicamente se encuentra ubicada en el distrito minero de Marcona: dentro del área de estudio se encuentran los depósitos de Marcona (1.9 Gt @ 55.4 % Fe), Mina Justa (346.6 Mt @ 0.71 % Cu), Pampa de Pongo (con más de 3 Gt @ 40 % Fe, y valores de Cu), la mina paralizada Hierro Acarí (con ~40Mt @ 66 % Fe), y la mina artesanal Cobrepampa (~5 Mt @ 2-5 % Cu). Debido a la importancia de estos yacimientos, estudios geológicos son necesarios para su adecuada comprensión e identificación de nuevos blancos exploratorios en el área de estudio. En este trabajo se busca caracterizar petrográficamente y geoquímicamente el magmatismo del distrito minero de Marcona, así como la discriminación de los eventos magmáticos y de sus posibles relaciones con la mineralización de los depósitos IOCG-skarn, y como guía para estudios más detallados en el futuro.

2. Marco geológico

Estudios estratigráficos y de emplazamiento de rocas subvolcánicas y plutónicas, realizados por Caldas (1978) y revisados por Contreras (2014), han distinguido 14 unidades litológicas (Fig. 1): los gneis graníticos

proterozoicos del Complejo Basal de la Costa; las diamictitas, tillitas, y calizas de la Formación Chiquerío, del Neoproterozoico; los mármoles de la Formación San Juan, del Neoproterozoico; las rocas dolomíticas de la Formación Marcona, de posible edad Paleozoico inferior; la secuencia volcano-sedimentaria de la Formación Río Grande, atribuida al Jurásico medio; las calizas, areniscas, y conglomerados de la Formación Jahuay, atribuida al Jurásico superior; las areniscas y lutitas de la Formación Yauca, atribuida al Cretácico inferior; los conglomerados de la Formación Copara, atribuida al Cretácico inferior; las areniscas de la Formación Pisco, del Mioceno; las areniscas y conglomerados de la Formación Millo, atribuidos al Plioceno; y los depósitos cuaternarios.

Los intrusivos subvolcánicos están conformados por latíandesitas porfiríticas, de la unidad denominada Andesitas Tunga ("ocoitas"), atribuida al Cretácico inferior, que intruyen a unidades predecesoras, y los sills microdioríticos, atribuidos al Cretácico inferior, que intruyen a unidades predecesoras incluyendo a las Andesitas Tunga. Los intrusivos plutónicos que forman parte del Batolito de la Costa, de edad Cretácico inferior a superior, están conformados por dioritas, cuarzo-dioritas, y tonalitas a granodioritas (Contreras, 2014).

Se han identificado también 3 unidades morfoestructurales (Contreras, 2014):

1) La Cordillera de la Costa, que es una franja alargada de dirección NO-SE, ubicada en el sector suroeste. Está conformada por rocas precámbricas y unidades pre-mesozoicas, cortada por el Batolito de San Nicolás, y

cubierta por unidades cenozoicas. Está moldeada por la actividad del sistema de fallas Lechuza, Tunga, y Treinta Libras, de rumbo NO-SE (Fig. 1).

2) La depresión Ica-Nasca corresponde a una depresión estructural ubicada entre la Cordillera de la Costa y las estribaciones de la Cordillera Occidental. Está limitada hacia el suroeste por el sistema de fallas Tunga y Treinta Libras, y hacia el noreste por el sistema de fallas Cerrillos

y Bella Unión (Fig. 1).

3) Las estribaciones de la Cordillera Occidental corresponden al borde occidental de la Cordillera de los Andes. Está limitada hacia el suroeste por el sistema de fallas Cerrillos y Bella Unión (Fig. 1). La morfología está moldeada por fallas normales de dirección NO-SE con buzamientos hacia el oeste, que afectan principalmente al Batolito de la Costa (Contreras, 2014).

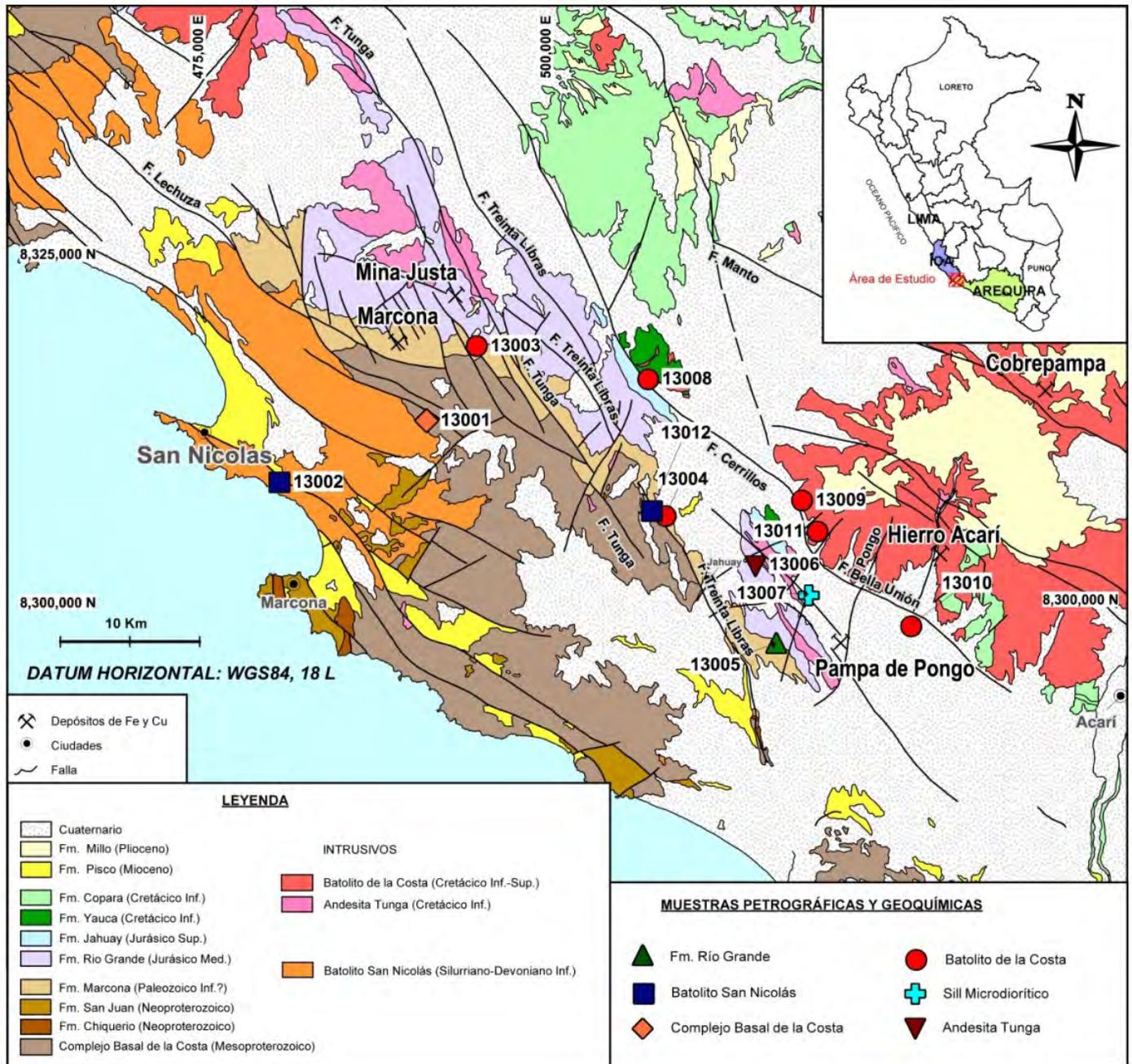


Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio, mostrando la ubicación de las muestras estudiadas.

3. Metodología

Para la caracterización petrográfica y geoquímica del magmatismo en el área de estudio, se tomó un total de 24 muestras: 12 muestras para estudios petrográficos, y 12 muestras destinadas a análisis químicos (de roca total, y multielemental incluyendo tierras raras). Estas 24

muestras se reparten de la siguiente manera: 2 muestras corresponden al Complejo Basal de la Costa, 4 al Batolito de San Nicolás, 2 a las riodacitas Río Grande, 2 a las andesitas Tunga, 2 a los sills microdioríticos, y 12 al Batolito de la Costa.

4. Petrografía

3.1. Complejo Basal de la Costa

Muestra 13001. Se trata de un gneis monzogranítico, de textura hipidiomórfica y gráfica reléctica. El cuarzo primario ocurre como cristales anhedrales de formas irregulares. El cuarzo II se presenta como cristales monocristalinos. Los feldespatos potásicos (microclina) se presentan como cristales anhedrales. Las plagioclasas ocurren como cristales anhedrales con formas tabulares e irregulares. Los minerales ferromagnesianos (anfíboles, biotita, piroxenos) ocurren como agregados alargados, fibrosos, y alterándose a cloritas, carbonatos y minerales opacos (Fig. 2A).

3.2. Batolito de San Nicolás

Muestras 13002 y 13012. Se trata de un granito de textura hipidiomórfica. El cuarzo ocurre como cristales anhedrales de formas irregulares. Los feldespatos

potásicos (ortosa) se presentan como cristales subhedrales. Las plagioclasas se encuentran como cristales subhedrales a euhedrales con formas tabulares. Los minerales ferromagnesianos (principalmente anfíboles y biotita) ocurren como minerales alargados alterándose a cloritas y carbonatos (Fig. 2B).

3.3. Riodacitas Río Grande

Muestra 13005. Se trata de una riodacita de textura poiquilítica con matriz micropoiquilítica. El cuarzo primario (cz I) se encuentra como escasos fenocristales con formas anhedrales y bordes ligeramente corroídos por la matriz, y como constituyente esencial de esta matriz. El cuarzo II se encuentra como cristales anhedrales. Los feldespatos potásicos se hallan como cristales anhedrales, agregados radiales y esferulíticos, por desvitrificación de la matriz. El vidrio volcánico ocurre en fragmentos orientados en la matriz. Está desvitrificado a cuarzo, feldespatos, y arcillas (Fig. 2C).

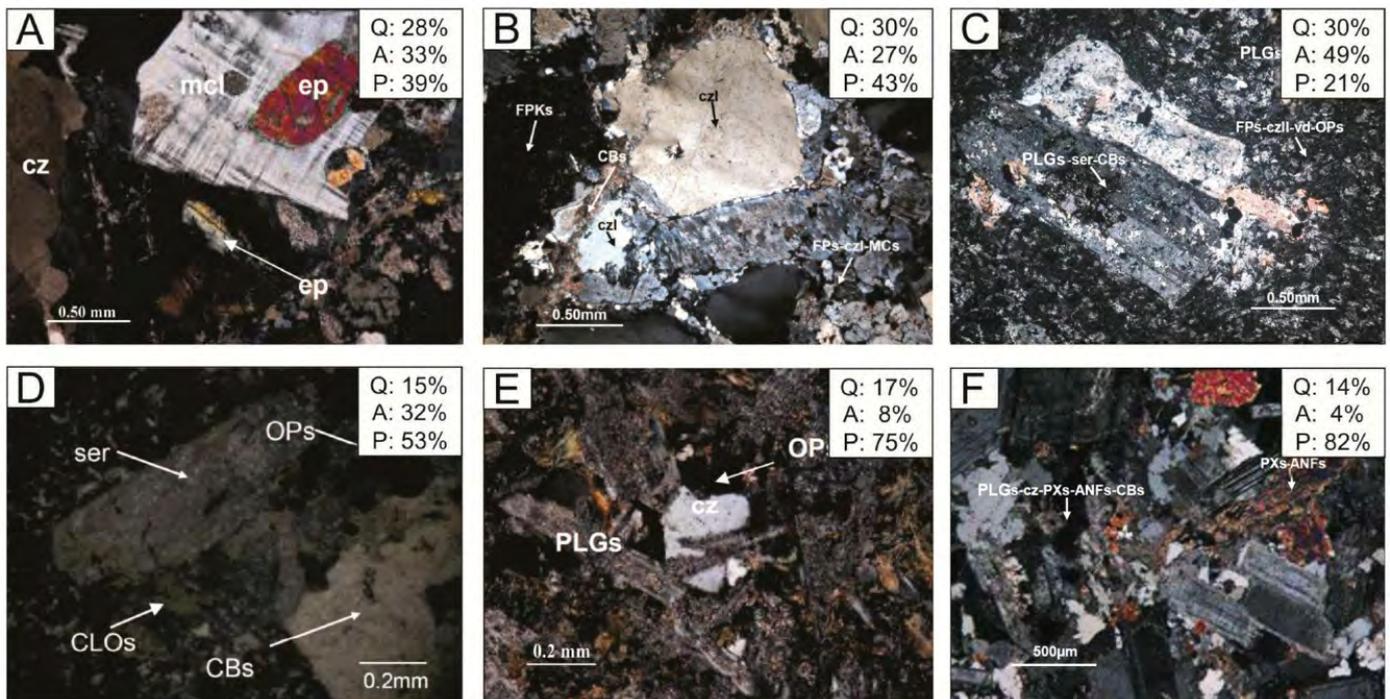


Figura 2. Microfotografías de rocas magmáticas muestreadas en el distrito minero de Marcona. **A:** Complejo Basal de la Costa. **B:** Batolito de San Nicolás. **C:** Riodacitas Río Grande. **D:** Andesitas Tunga. **E:** Sill microdiorítico. **F:** Batolito de la Costa. Las fotos han sido tomadas en luz polarizada analizada. Abreviaturas para minerales: ANFs = anfíboles, CBs = carbonatos, CLOs = cloritas, cz = cuarzo, ep = epidota, FPKs = feldespatos potásicos, mcl = microclina, MCs = micas, OPs = minerales opacos, PLGs = plagioclasas, ser = sericita. Los porcentajes de Q, A, y P son estimados a partir de la norma CIPW (según el diagrama de Streckeisen Q: cuarzo, A: feldespatos potásicos, P: plagioclasas).

3.4. Andesitas Tunga

Muestra 13006. Esta unidad se describe también como "ocoitas" por su facies porfírica. Se trata de una cuarzo-latita de textura porfírica. Las plagioclasas son los minerales más abundantes en la muestra y ocurren como cristales euhedrales con formas rectangulares y hábito tabular. Los feldespatos potásicos se aprecian alterados por sericita y cloritas. Presentan cristales euhedrales con formas cuadradas y hábito tabular corto. El cuarzo primario (cz I) se aprecia como cristales anhedrales de

formas irregulares, que forma parte de la matriz, mientras que el cuarzo secundario se encuentra como cristales anhedrales y agregados granulares (Fig. 2D).

3.5. Sills microdioríticos

Muestra 13007. Se trata de una cuarzo-microdiorita de textura porfírica. El cuarzo primario se presenta a manera de cristales anhedrales, con superficies limpias, bordes irregulares, y extinción ondulatoria. Las plagioclasas ocurren a manera de cristales euhedrales y

subhedrales, con alteración a sericita. Los minerales ferromagnesianos están conformados por biotita, piroxenos, y anfíboles (Fig. 2E).

3.6. Batolito de la Costa

Muestras 13003, 13004, 13008, 13009, 13010, y 13011. Se trata de un pórfido cuarzo-diorítico. Las plagioclasas se presentan como fenocristales con formas subhedrales a euhedrales, algunos con bordes subredondeados, maclados, con zonalidad interna, con inclusiones de piroxenos y minerales opacos. El cuarzo primario se presenta con formas subhedrales, bordes subredondeados y ligeramente corroídos en intersticios de la matriz. Los piroxenos son fenocristales y agregados subhedrales, con bordes subredondeados; se hallan parcialmente reemplazados por anfíboles y alterados por epidota. Los anfíboles ocurren con formas anhedral y subhedrales en intersticios de la matriz y reemplazando a piroxenos (Fig. 2F).

4. Geoquímica

Los resultados del análisis químico presentados en este trabajo, se ensayaron usando los métodos ICP-AES e ICP-MS (con fusión de borato de litio y digestión con agua regia) en el laboratorio ALS Minerals. Los resultados del análisis químico de elementos mayores, expresados en los diagramas TAS (*total alkalis - silica*, según Cox et al., 1979), muestran que las rocas del Batolito de San Nicolás pertenecen a la serie calco-alkalina con alto contenido de K (Fig. 3A). Las riodacitas Río Grande y las andesitas Tunga pertenecen a la serie shoshonítica, caracterizada por alto contenido de K. Los sills microdioríticos caen en el campo de las series calco-alkalinas con un contenido medio de K. Las rocas del Batolito de la Costa se distribuyen en tres zonas (Fig. 3A), que representan posiblemente tres eventos magmáticos de diorita: la primera, BC-I, pertenece a una serie calco-alkalina con alto K; la segunda, BC-II, cae en el campo de la serie calco-alkalina con un contenido medio de K; y la tercera, BC-III, pertenece a una serie toleítica, con bajo contenido de K.

Para determinar el contexto geodinámico, se usó el diagrama de Pearce et al. (1984). Los resultados indican que todas las muestras se encuentran en el campo de rocas formadas en un arco magmático de subducción (VAG), lo que implica que los granitoides asociados son de tipo I (Fig. 3B). El bajo contenido de Rb en las rocas del Batolito de la Costa indicaría que los magmas correspondientes tuvieron un menor aporte cortical respecto al Batolito de San Nicolás, lo que se corrobora con la Figura 3E, donde se estima la profundidad de la corteza en la cual se generaron los magmas.

Usando el diagrama de tierras raras, basado en Sun & McDonough (1989) con valores normalizados al condrito C1, los resultados (Fig. 3C) indican un empobrecimiento de Eu, el cual sustituye al Ca en las plagioclasas (anortita según la norma de CIPW), lo que indica que hubo fraccionación de las plagioclasas durante la evolución del magma correspondiente. De acuerdo a este diagrama podemos distinguir tres firmas geoquímicas para los

eventos BC-I, BC-II, y BC-III en el Batolito de la Costa. Cada uno de ellos se relaciona con diferentes asociaciones metálicas. Los elementos trazas normalizados al manto primitivo según McDonough & Sun (1995), muestran anomalías negativas de Nb y Ti (Fig. 3D), lo cual sugiere retención de estos elementos en la fuente durante la fusión parcial, lo que es típico de sistemas magmáticos de tipo I en las zonas de subducción.

En base al diagrama Ce/Y vs. SiO₂ (propuesto por Mantle y Collins, 2008), se puede estimar la profundidad cortical en la que se generaron los magmas (Fig. 3E): según este modelo, el Batolito de San Nicolás se habría formado a profundidades mayores a 40 km; las andesitas Tunga a ~32 km de profundidad; las microdioritas a ~35 km de profundidad; y el Batolito de la Costa, entre los 22 y 32 km de profundidad.

5. Relación con la mineralización

La distribución de yacimientos IOCG-skarn en el área de estudio está relacionada a diferentes facies de granitoides, los cuales se formaron durante la actividad de los diferentes arcos magmáticos mesozoicos: Río Grande en el Jurásico medio; andesitas Tunga ("ocoitas") en el Cretácico inferior; Grupo Casma-Copara en el Cretácico inferior; y el Batolito de la Costa en el Cretácico inferior a superior; según Chen et al. (2010) y Contreras (2014).

Según Blevin & Chappell (1992), el tipo magmático de las ocurrencias metálicas sería fundamentalmente controlado por la composición, diferenciación, y estado redox (\approx contenido de hierro) de los magmas. El diagrama Eu/Eu* vs. FeO_{total} (Fig. 3F) relaciona las diferentes asociaciones metálicas (Lang & Baker, 2001).

Las muestras de cuarzo-monzodiorita correspondientes al Batolito de la Costa (BC-I) caen en el campo de asociaciones Fe-Cu-Au, lo que indicaría que posiblemente estén asociadas a la mineralización de Pampa de Pongo. Las muestras de cuarzo-monzodiorita (BC-II) caen en el campo de ocurrencias metálicas Cu-Au, lo que indicaría que probablemente están asociadas a la mineralización de Cu de Mina Justa. Y las muestras correspondientes a dioritas (BC-III) se ubican fuera del campo de asociaciones metálicas.

Las muestras de riodacitas Río Grande caen en el campo del Mo, no mostrando ninguna relación con la mineralización de Fe de Marcona (Fig. 3A).

6. Conclusiones

En el distrito minero de Marcona, el Batolito de San Nicolás cristalizó a partir de magmas graníticos que corresponden a la serie calco-alkalina, indicando que se formó probablemente en un contexto de arco volcánico (VAG).

Las riodacitas Río Grande corresponden a la serie shoshonítica, de alto contenido de K, y no muestran ninguna relación con la mineralización.

Las andesitas Tunga ("ocoitas") son cuarzo-latitas que también corresponden a la serie shoshonítica, y tampoco muestran alguna relación con las asociaciones metálicas.

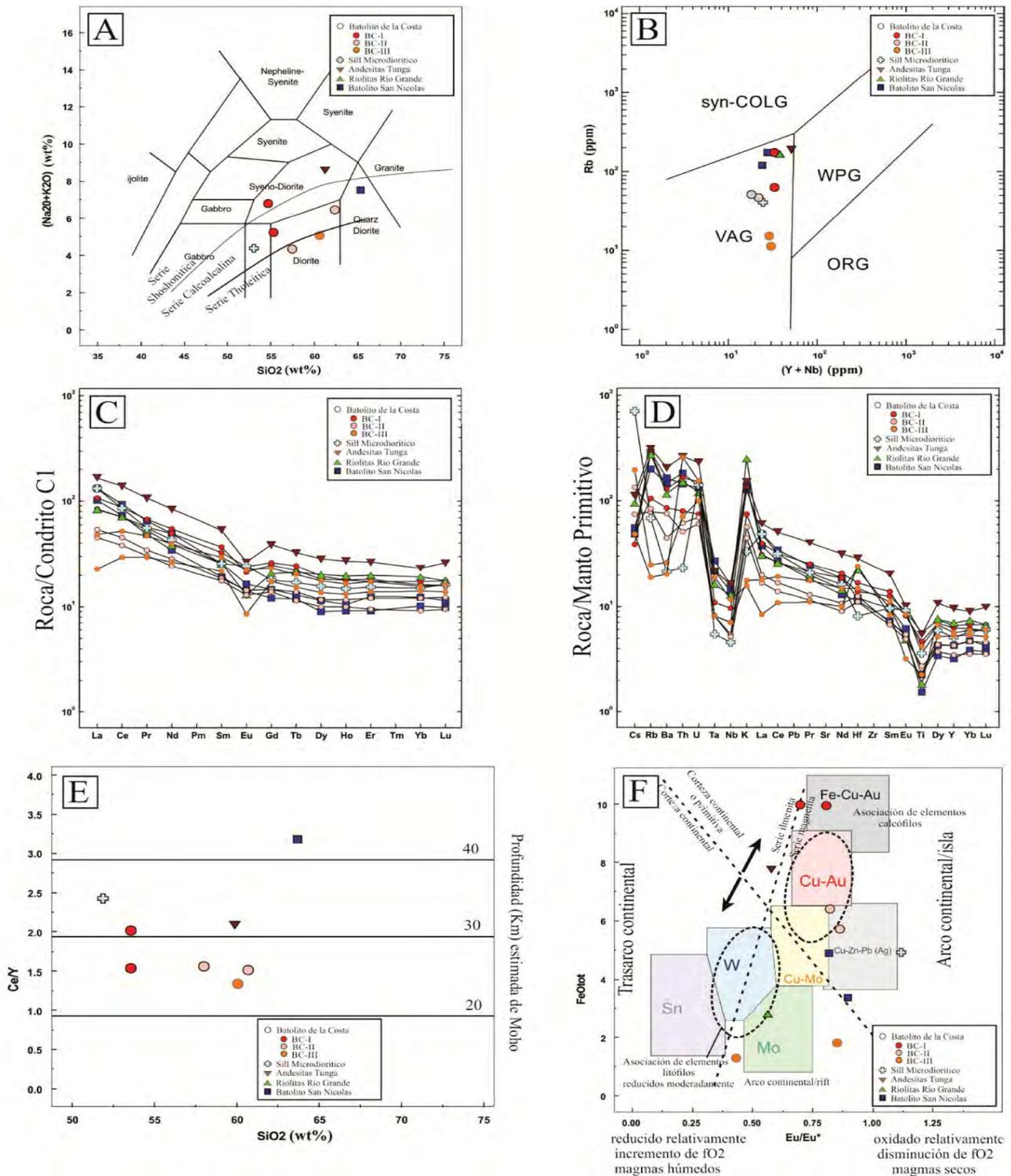


Figura 3. A: Diagrama TAS, según Cox et al. (1979). B: Contexto geodinámico de los magmas, según el diagrama Y+Nb vs. Rb (Pearce et al., 1984). C: Diagrama de tierras raras, normalizado al condrito C1, según Sun & McDonough (1989). D: Diagrama "spider" de elementos trazas, normalizado al manto primitivo, según McDonough & Sun (1995). E: Diagrama Ce/Y para estimar la profundidad de los magmas, según Mantle & Collins (2008). F: Diagrama Eu/Eu^* vs. FeO total, con asociaciones de metales, según Lang & Baker (2001).

Los sills microdioríticos corresponden a la serie calcoalcalina y tienen características de magmas de arco volcánicos (VAG), pero no muestran una relación con la mineralización.

Las rocas del Batolito de la Costa están conformadas por dioritas, monzodioritas, y tonalitas, que cristalizaron en un arco magmático (VAG). Tres pulsos magmáticos quedan identificados en el Batolito de la Costa:

- El primero, llamado BC-I, puede estar relacionado con

la mineralización de Fe en Pampa de Pongo.

- El segundo, BC-II, puede estar relacionado con la mineralización de Cu en Mina Justa.
- El tercero, BC-III, no presenta ninguna relación con la mineralización.

Pese a la limitada cantidad de muestras analizadas, el presente trabajo proporciona una guía para estudios más detallados que se realicen en la zona de estudio en el futuro.

Referencias

- Blevin, P.L., Chappell, B.W. 1992. The role of magma sources, oxidation states, and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. Second Hutton Symposium, Australia.
- Chen, H., Clark, A.H., Kyser, T.K., Ullrich, T.D., Baxter, R., Chen, Y., Moody, T.C. 2010. Evolution of the giant Marcona-Mina Justa iron oxide-copper-gold district, south-central Peru. *Economic Geology*, v. 105, p. 155-185.
- Chirif, H. 2006. Introducción a la petrología de rocas ígneas. Lima, Perú.
- Contreras, M. 2014. Definición del contexto estratigráfico, magmático y estructural del yacimiento Pampa de Pongo para construir el modelo geológico y tectónico, Bella Unión-Caravelí-Arequipa. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J. 1979. The interpretation of igneous rocks. Allen & Unwin, London, 450 p.
- Injoque, J., Atkin, B., Harvey, P., Snelling, N. 1988. Mineralogía, geoquímica y geocronología del skarn geotermal de hierro de Marcona. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 78, p. 65-80.
- Injoque, J. 2002. Fe oxide-Cu-Au deposits in Peru: An integrated view. In T.M. Porter (ed.), *Hydrothermal iron oxide-copper-gold and related deposits: A global perspective*, 2. PGC Publishing, Adelaide, Australia, p. 97-113.
- Lang, J.R., Baker, T. 2001. Intrusion-related gold systems: The present level of understanding. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 477-489.
- Mantle, G.W., Collins, W.J. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. *Geology*, v. 36, p. 87-90.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956-983.
- Rollinson, H.R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Geochemistry Series, Routledge, New York, 384 p.
- Rudnick, R.L., Gao, S. 2003. Composition of the continental crust. In: R.L. Rudnick (ed.), *The Crust*, vol. 3, Elsevier, p. 1-64.
- Sun, S., McDonough, W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *The Geological Society of London, Special Publications*, v. 42, p. 313-345.