

# EL SKARN MAGNÉSICO DE PAMPA DEL PONGO: UN MEGAYACIMIENTO DE HIERRO EN LA CORDILLERA DE LA COSTA DEL SUR DEL PERÚ

Gustavo Calvo<sup>1</sup>, Omar Rodriguez<sup>1</sup>, Marco Serrano<sup>2</sup>, Fernando Tornos<sup>3</sup>, Rildo Rodriguez<sup>4</sup>, Francisco Velasco<sup>5</sup>, Marco Contreras<sup>1</sup>, Javier Ochoa<sup>1</sup>, Milena Urbina<sup>1</sup>, Marcos Sapacayo<sup>1</sup>

- (1) Buenaventura Ingenieros S.A., Larrabure y Unanue 146, Lima, Perú
- (2) Jinzhao Mining Perú, c/ Colombia 791, San Isidro, Lima, Perú
- (3) Centro de Astrobiología, CSIC-INTA, Crta. Ajalvir km 4, 28850 Torrejon de Ardoz, Madrid, España
- (4) Instituto Geológico Minero Metalúrgico del Perú, Av. Canadá s/n Lima, Perú
- (5) Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad del País Vasco, Barro Sarriena s/n 48940 Lejona, Vizcaya

## RESUMEN

Pampa del Pongo (PDP) es uno de los mayores skarns de hierro del mundo con más de 3 Gt de mineralización en un cuerpo elipsoidal de dirección NNW-SSE, con dimensiones de 7km x 1.2km y una potencia que varía entre 120 y 600m. Estructuralmente, está localizado dentro del corredor NNW-SSE desarrollado entre las fallas regionales Treinta Libras y Cerrillos-Bella Unión. La mineralización se relaciona con los primeros estadios de la intrusión del Batolito de la Costa (Cretácico Inferior). PDP es un skarn magnésico clásico desarrollado sobre la dolomía de la Fm Marcona y dominado por magnetita y forsterita (posteriormente remplazada por serpentina) que evoluciona lateralmente a remplazamientos de tipo dolomía + magnetita, con zonas locales enriquecidas en calcopirita, pirita, pirrotita y vonsenita. Las rocas suprayacentes, fundamentalmente la Fm Rio Grande, están afectadas por una alteración alcalino-cálcica similar a la relacionada con otros depósitos de tipo IOCG o magnetita-apatito cercanos (Marcona, Mina Justa, Hierro Acarí, Cobrepampa, entre otros) y que forman parte del cinturón de depósitos de hierro con cantidades variables de cobre y oro que se extiende desde Santiago de Chile hasta el sur de Lima.

## INTRODUCCION

El yacimiento de Pampa del Pongo (PDP) está situado en la localidad de Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de **Arequipa** (74° 50" W y 15° 23" S). PDP es uno de los mayores skarns de hierro del mundo, con un potencial estimado > 3,000Mt @ 40% Fe, 0.1% Cu, 0.1g/t Au. El yacimiento se encuentra en la parte septentrional de la cuenca miocénica de Pisco, desarrollada sobre el antiguo arco volcánico Jurásico (Fm Río Grande) y dentro del distrito minero de Marcona, donde existen otros yacimientos conocidos tales como Marcona (1,900Mt @ 55.4% Fe, 0.12% Cu); Mina Justa (413Mt @ 0.79% Cu, 0.05g/t Au, 3.8g/t Ag); Hierro Acarí (40Mt @ 66% Fe) y Cobrepampa (~5Mt @ 2-5% Cu) los cuales forman parte de un estrecho cinturón de depósitos de óxidos de hierro con cantidades muy variables de cobre y oro, emplazados en el margen occidental de la Cordillera de la Costa, que se extiende entre Santiago de Chile y el sur de Lima, a lo largo una distancia aproximada de 3,300 Km (Sillitoe, 2003).

El yacimiento PDP no aflora en superficie y fue descubierto por Rio Tinto en 1994, gracias a las anomalías aeromagnéticas identificadas en una zona cubierta por sedimentos recientes (Hawkes et al., 2002). Trabajos de exploración posteriores han incluido, geofísica IP (polarización inducida), TEM (*Transient Electromagnetic Survey*), gravimetría y la perforación de 251 sondeos diamantinos (156,286m). En la actualidad la empresa Jinzhao Mining Perú, operadora del proyecto, está completando los estudios necesarios para iniciar la etapa de factibilidad.

## GEOLOGIA

Los estudios geológicos realizados en los alrededores de PDP, han permitido revisar las características y edades de las unidades estratigráficas establecidas (Fig. 1). El basamento del distrito de Marcona está conformado por orto- y paragneis del Complejo Basal de la Costa de edad mesoproterozoica perteneciente al Macizo de Arequipa (Caldas, 1987; Loewy et al., 2004); discordante sobre este

basamento se encuentran, rellenando grábenes, calizas en estratos delgados con algunas intercalaciones en la base de tilloides/diamictitas con fragmentos polimícticos del basamento, soportados e intercalados con metapelita y metamarga (Brecha Chiquerio) que corresponden a la Formación San Juan (~250m) del Paleozoico Inferior (?). Discordante sobre la anterior se encuentra la Fm Marcona (650m), principal metalotecto del distrito, donde se han reconocido tres secuencias características que de la base a techo son las siguientes: (1) dolomías en estratos gruesos y masivos; (2) lutitas, areniscas y brechas sedimentarias con clastos de dolomía; y, (3) dolomías en estratos gruesos y masivos. La edad de esta formación fue atribuida al Carbonífero por Atchley (1956) y Hudson (1974); más tarde, Caldas (1987) la atribuyó al Paleozoico Inferior (pre-Ordovícico) debido a que se encuentra intruida por el Batolito de San Nicolás (Ordovícico). Nuevas dataciones en afloramientos atribuidos a este batolito indican edades Jurásico-Cretácico (Chara, 2000); en consecuencia, es posible que la Fm Marcona sea más joven que lo estimado por Caldas. Las similitudes litológicas con los grupos Ambo y Tarma en la zona de Chala, y la correlación regional con el Perú central, sugieren que la edad Carbonífero asignada por Atchley (1956) y Hudson (1974) sería la más adecuada. Tras un hiato y posterior erosión, durante el Aleniano-Bajociano (Jurásico Medio), se depositó la Fm Río Grande (500m) constituida por una secuencia inferior de brechas volcánicas intercaladas con lavas dacíticas, y una secuencia superior conformada por areniscas rojizas intercaladas con horizontes delgados de caliza azulada fosilífera y brechas y lavas andesíticas; en la zona de Pampa del Pongo dominan las facies coherentes, con coladas y domos, mientras que hacia el noroeste se hacen cada vez más volcanoclásticas; esta formación alberga mineralizaciones tipo IOCG (*Iron Oxide-Copper-Gold*) en Mina Justa y posiblemente en los cuerpos de brechas y filones de magnetita de PDP. Sobreyaciendo con contacto gradacional se encuentra la Fm Jahuay del Kimmeridgiano-Titoniano (Jurásico Superior) constituida por intercalaciones de calizas fosilíferas gris oscuras y calcarenitas de grano grueso con canales conglomeráticos (400m); seguidamente se depositaron con ligera discordancia angular, una secuencia de areniscas cuarzosas, limolitas con niveles de caliza, y hacia el techo horizontes delgados de arenisca tobácea verde y lavas andesíticas (500m), correspondientes a la Fm Yauca del Neocomiano (Cretácico Inferior). Por último durante el Cenozoico se desarrolló un evento tectónico distensivo que originó grabens y horts (Cuenca Pisco Oriental) donde se depositaron areniscas tobáceas intercaladas con horizontes delgados de diatomitas y arcillas (350m) pertenecientes a la Fm Pisco del Mioceno.

El evento magmático más antiguo registrado corresponde al Batolito de San Nicolás de edad Ordovícico; algunos datos inéditos indican que ciertos cuerpos intrusivos atribuidos a este batolito corresponden en realidad a eventos magmáticos de edades Permo-Triásico, Jurásico Medio y Cretácico (Chara, 2000). El Batolito de la Costa, aflora al Este de la zona mineralizada y está separado de la misma por la Falla Bella Unión. En este sector del batolito predominan cuarzo dioritas y los afloramientos más cercanos a la mineralización han sido datados en  $109 \pm 4$  Ma (Vidal et al. 1990). Toda la secuencia del Paleozoico-Mesozoico está cortada por abundantes diques, sills y pequeños stocks de andesita porfírica (ocoíta) y microdiorita, los cuales generalmente preceden a la mineralización de PDP y al emplazamiento del Batolito de la Costa.

## MINERALIZACION

El depósito de Pampa del Pongo consiste en un cuerpo semi-masivo a masivo de magnetita que presenta una forma elipsoidal aplastada grosera de dirección NNW-SSE con un eje mayor de unos 7 km, una anchura entre 0.7 y 1.2 km y una potencia que varía entre 120 y 600 m y se extiende en algunos casos hasta el basamento mesoproterozoico. La mayor parte de la mineralización (>90%) se encuentra remplazando a la dolomía de la Fm Marcona, y presenta una mineralogía típica de los skarn magnésicos (Fig. 2 y 3).

En la zona mineralizada se han distinguido varias etapas de alteración-mineralización: La mineralización principal es de morfología estratoide y está casi exclusivamente asociada a un skarn magnésico progrado, formado por una zona de forsterita-calcita-flogopita accesoria que es remplazada por otra, dominante, de magnetita-forsterita ( $fo_{95-96}$ ). Localmente, se desarrolla un skarn piroxenítico ( $hd_{5-12}$ ) rico en flogopita y adularia que solo muy localmente contiene magnetita.

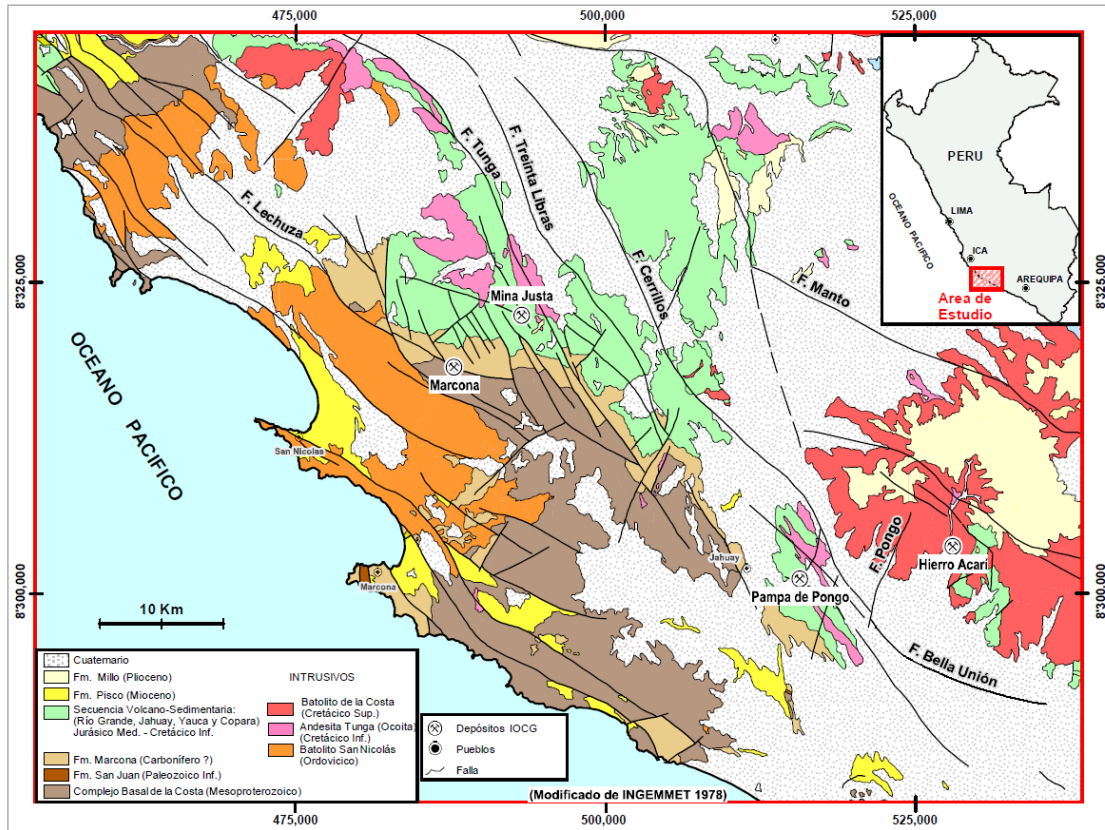


Figura 1. Mapa Geológico Generalizado del Distrito Minero de Marcona.

El clinopiroxeno contiene inclusiones fluidas hipersalinas y policristalinas que coexisten con inclusiones ricas en vapor. A veces, este skarn magnésico evoluciona a recurrencias cálcicas con clinopiroxeno ( $hd_{19-48}$ ) y grandita que se hace cada vez más férrica ( $ad_{53-97}$ ) o a zonas de sílice masiva. La forsterita está casi totalmente remplazada por serpentina (crisotilo-lizardita). Las evidencias de que la mayor parte de la serpentina del depósito proviene de la hidratación de la forsterita incluyen la presencia de exsoluciones de ulvoespinela y hercinita en la magnetita – indicativas de temperaturas de formación superiores a  $500^{\circ}\text{C}$  – y de pequeños pero abundantes restos de forsterita dentro de la serpentina. Lateralmente al skarn progrado se desarrolla una zona de remplazamiento, también de alta temperatura, de magnetita-dolomita con elevadas cantidades de ludwigita y que se interpreta como una aureola metasomática distal al skarn, formada por la circulación de fluidos similares, pero ya empobrecidos en sílice, y que no llegan a estabilizar silicatos. Es en esta roca donde se concentran la mayor parte de los sulfuros de la mineralización, básicamente pirita, calcopirita y pirrotina. La pirrotina se puede encontrar en grandes cristales tabulares que están remplazados por magnetita, carbonatos, pirita y marcasita. El skarn magnésico retrógrado es minoritario y está formado por tremolita ( $tr_{90-95}$ ), magnetita, flogopita, biotita verde y feldespato K.

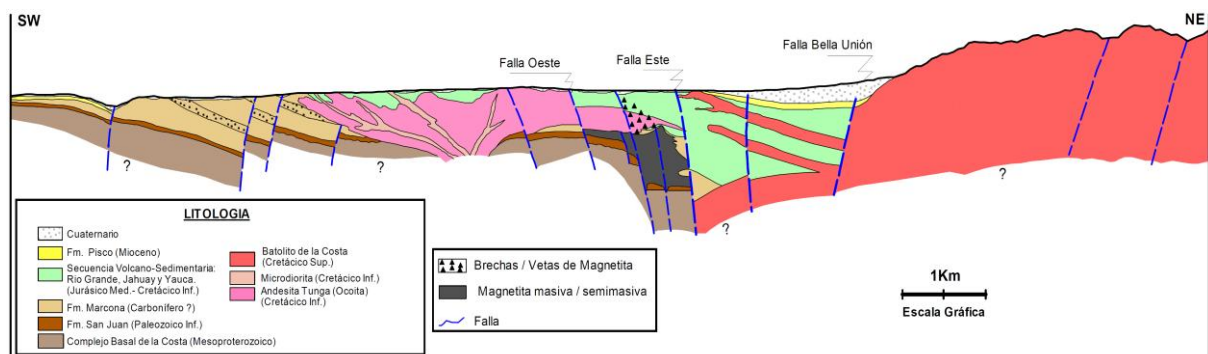
La serpentización de la forsterita está asociada al remplazamiento parcial del diópsido a flogopita, tremolita y clinocloro y la removilización de parte de la magnetita. Junto con la serpentina hay cantidades variables de vermiculita, amesita, calcita y ceolitas. Sincrónicamente, tiene lugar un remplazamiento generalizado de la dolomita por calcita. La edad y el origen de los fluidos responsables de esta hidratación generalizada del sistema son desconocidos, pero el proceso tuvo lugar entre los  $250$  y  $100^{\circ}\text{C}$ .

En el extremo noroeste de la mineralización principal (Zona 2) existe un cuerpo mineralizado vertical, de aproximadamente  $500\text{m}$  de diámetro, que corta toda la secuencia hasta la Fm Yauca y que está formado por brechas hidrotermales y filones que representan aproximadamente el 10% del total de los recursos. Los filones son multidireccionales y tienen potencias de hasta  $10\text{m}$  mientras que los cuerpos de brecha son muy irregulares y gradan desde *stockworks* y brechas *crackle* cementados por magnetita y dolomita – con cantidades variables de sulfuros y ludwigita – a brechas hidrotermales con fragmentos hasta métricos, con poco desplazamiento y soportados por un cemento similar al anterior.

Tanto en los filones como en las brechas quedan restos de un skarn magnésico progrado similar al descrito en los cuerpos estratoides; destaca la presencia sistemática de serpentina formando una primera zona en el relleno de la brecha y que es producto de la hidratación de la forsterita. La formación de estos cuerpos de brecha se interpreta como asociada a la fracturación hidráulica motivada por la sobrepresión de fluidos acumulados bajo la Fm Río Grande, que incluiría tanto a los fluidos magmáticos como al CO<sub>2</sub> generado por la decarbonatación de la dolomía durante la formación del skarn.

La mineralización se presenta dentro de una gran zona de alteración hidrotermal de dimensiones kilométricas que excede con mucho la extensión la Fm Marcona y afecta a toda la secuencia estratigráfica hasta la Fm Yauca. Igualmente, los abundantes diques de microdiorita y, en menor medida, de ocoíta y los pórfidos monzograníticos que cortan a la Fm Marcona están alterados hidrotermalmente y localmente mineralizados. En este gran halo desarrollado alrededor de la mineralización principal, existe una importante alteración alcalino-cálcica, muchas veces texturalmente destructiva, representada por la formación de feldespato potásico, clinopiroxeno (hd<sub>49-62</sub>) y actinolita con cantidades menores de albita (ab<sub>96-98</sub>) y cantidades significativas de marialita y epidota (ps<sub>26-32</sub>), que se desarrolla preferentemente en la andesita más permeable y a favor de contactos litológicos y fallas. Localmente se desarrolla un periskarn cálcico (en el sentido de Zharikov, 1970) formado por clinopiroxeno (hd<sub>17</sub>), plagioclasa (an<sub>40-50</sub>) y grandita (ad<sub>52-57</sub>). Las rocas volcánicas y sedimentarias suprayacentes a la Fm Marcona están cortadas por abundantes venillas de calcita y cuarzo –acompañadas de silicificación– que son interpretadas como producto de la circulación de los fluidos “exhaustos” en la periferia de la mineralización. Hasta el momento, no se han identificado rocas ígneas que puedan ser interpretadas inequívocamente como las responsables de la formación de este extenso sistema magmático- hidrotermal.

El yacimiento PDP está localizado dentro de un corredor estructural de deformación dúctil-frágil de dirección NNW-SSE, desarrollado entre las fallas regionales Treinta Libras y Cerrillos-Bella Unión (Fig. 1). En detalle, la morfología de los cuerpos mineralizados y las anomalías magnetométricas, sugieren que el control local de la mineralización son estructuras tensionales N110°-120° desarrolladas en un contexto transcurrente sinistral, relacionado con la subducción oblicua de la Placa de Nazca.

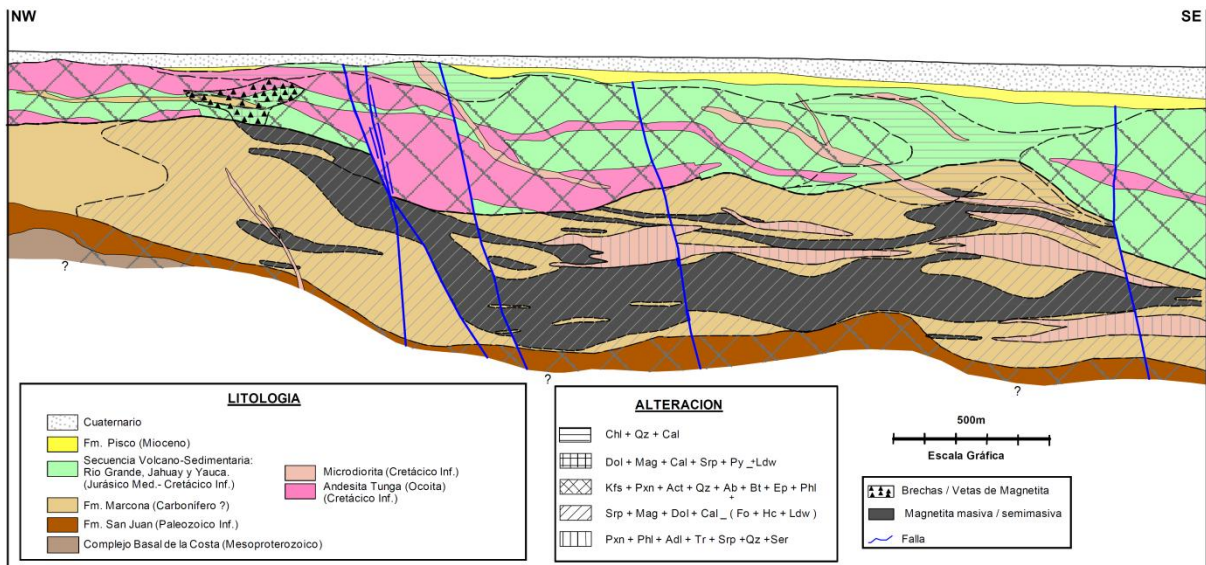


**Figura 2.** Sección Transversal del Yacimiento Fe-(Cu-Au) de Pampa del Pongo (Bisa, 2012)

## DISCUSIÓN: ORIGEN, EVOLUCIÓN Y RELACION CON LOS DEPOSITOS CERCANOS

La mineralización principal en PDP está relacionada con un skarn magnésico, aunque también existe una proporción menor de magnetita asociada a brechas y filones hidrotermales en los volcánicos de la Fm Río Grande, que podrían tener características similares a los yacimientos tipo IOCG clásicos. En este marco, la presencia de rocas volcánicas coherentes en la Fm Río Grande, fue probablemente crítica para el confinamiento de la mineralización en la Fm Marcona, actuando como un sello que favoreció el escape lateral de los fluidos hidrotermales e inhibió el remplazamiento de las rocas volcánicas. La presencia de rocas volcanoclásticas hubiera favorecido la formación de mineralizaciones tipo IOCG como las conocidas en Mina Justa (Chen et al. 2010) y Candelaria (Marschik y Fontbote 2001).

El modelo genético implicaría la intrusión epizonal de un magma correspondiente a los primeros estadios del Batolito de la Costa, a favor de estructuras tensionales asociadas con una deformación de desgarre; durante su cristalización, alcanzaría la saturación en fluidos con la consiguiente exsolución, dando lugar a un sistema magmático hidrotermal que origina el remplazamiento de la dolomía de la Fm Marcona por un skarn magnésico progrado y de las otras litologías de la zona por un skarn cálcico y/o una alteración alcalino-cálcica.



**Figura 3.** Sección Longitudinal del Yacimiento Fe-(Cu-Au) de Pampa del Pongo (BISA, 2012). Abreviaturas: **Ab**: albita; **Act**: actinolita; **Adl**: adularia; **Bt**: Biotita; **Cal**: calcita; **Chl**: clorita; **Di**: diópsido; **Dol**: dolomita; **Ep**: epidota; **Kfs**: feldespato potásico; **Fo**: forsterita; **Hc**: hercinita; **Ldw**: ludwigita; **Mag**: Magnetita; **Phl**: flogopita; **Pxn**: piroxeno; **Py**: pirita; **Qz**: cuarzo; **Ser**: sericita; **Srp**: serpentina; **Tr**: tremolita.

La presencia de sulfuros, con abundante pirrotina temprana, y de frecuente anhidrita sugiere que el sistema era rico en azufre pero que parte de éste estaba en condiciones oxidadas en un esquema similar al de otros sistemas tipo IOCG o pórfidos cupríferos. La escasa abundancia de cobre (aprox. 0.1% Cu) y la estimada baja temperatura del skarn retrógrado sugiere que o bien la relación Fe/Cu era muy alta – superior a la de otros sistemas similares – o el sistema se empobreció en Cu-Au antes de formarse esta mineralización.

La información existente indica que la mineralización Fe±Cu±Au en el distrito de Marcona abarca un largo periodo que se extiende desde 177 a 95 Ma (Chen et al., 2010, Injoque et al., 1988, Vidal et al., 1990). No disponemos en este momento de dataciones del depósito de Pampa del Pongo. Sin embargo, la alteración prograda (Etapa I) es claramente posterior a la deposición de la Fm Yauca (<125 Ma) y a la intrusión de los diques de microdiorita y ocoíta; diques postminerales de ocoíta similares a los de PDP han sido datados con edades de 118-137 Ma en Marcona (Chen et al., 2010). Hawkes et al. (2002) indican que el pórfido de Acarí, datado en 109 ±4 Ma (Vidal et al., 1990) es posterior a la formación del depósito. Por lo tanto, la mejor acotación temporal para Pampa del Pongo esta entre 125 y 109 Ma. De ser esto cierto, Pampa del Pongo es significativamente más joven que el depósito de Marcona (ca. 162 y 154 Ma, Injoque et al., 1988 y Chen et al., 2010) y posiblemente anterior a la formación de Mina Justa (95-104 Ma, Chen et al. 2010) pero se encuadra a grosso modo dentro del intervalo de edades correspondientes al cinturón IOCG andino (170-110 Ma, Sillitoe, 2003)

Por último, concluimos que en el distrito de Marcona coexisten diversos estilos de mineralización: skarns cálcicos y magnésicos, sistemas IOCG y magnetita-apatito, formados en diferentes eventos, siendo todos ellos parte de grandes sistemas magmático-hidrotermales similares a los que dan lugar a los principales yacimientos IOCG de la Cordillera de la Costa.

## BIBLIOGRAFIA

- Atchley, F. W. (1956) Geology of the Marcona iron deposit, Peru. Unpublished Ph.D. thesis, Stanford University, 150p.  
 Caldas, J. (1978) Geología de los cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca, INGEMMET, Boletín 30.

- Chara (2000) Petrografía, geocronología y exploración minera en el cuadrángulo de Ica: nuevos datos, X Congreso Peruano de Geología, Lima, Sociedad Geológica del Perú, p. 410-424.
- Chen, H., Clark, A. H., Kyser, T. K., Ullrich, T. D., Baxter, R., Chen, Y. and Moody, T. C. (2010) Evolution of the giant Marcona-Mina Justa iron oxide-copper-gold district, south-central Peru. *Economic Geology*, 105, 155-185.
- Hawkes, N., Clark, A. H. and Moody, T. C. (2002) Marcona and Pampa del Pongo: Giant Mesozoic Fe-(Cu, Au) deposits in the Peruvian coastal belt. *In* Porter, T. M. (ed.) *Hydrothermal Iron Oxides Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 2, PGC Publishing, Adelaide, 115-130.
- Hudson, C. (1974) Metallogenesis as related to crustal evolution in Southwest Central Peru. Ph.D. thesis, University of Liverpool, 246p.
- Injoque, J., Atkin, B. Harvey, P., Snelling, N. (1988) Mineralogía, geoquímica y geocronología del skarn geotermal de hierro de Marcona, *Bol. Soc. Geol. del Perú*, v. 78, 65-80.
- Loewy, S.L., Connelly, J.N. and Dalziel, I.W.D. (2004) An orphaned basement block; the Arequipa –Antofalla basement of the central Andean margin of South America, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116, 171-187.
- Marschik, R., Fontboté, L. (2001) The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au- (Zn, Ag) deposits, Chile. *Econ Geol* 96: 1799-1826.
- Sillitoe, R. H. (2003) Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view, *Miner Deposita* 38: 787-812
- Vidal, C. E., Injoque, J.; Sidder, G. B., Mukasa, S. B. (1990) Amphibolitic Cu-Fe skarn deposit in the Central Coast of Peru, *Econ. Geol.*, Vol. 85, pp. 1447-1461.
- Zharikov, V. (1970) Skarns I, II, III, *Intern. Geol. Rev.*, pp. 541-559, 619-647, 760-775