

Respuesta al Comentario de F. Munizaga al artículo 'High magma oxidation state and bulk crustal shortening: key factors in the genesis of Andean porphyry copper deposits, central Chile (31-34°S)', de Garrido *et al.* (2002)

Iván Garrido

IGB Ltda., Casilla 189, Correo San Enrique-El Arrayán, Santiago, Chile
ivangarrido@igb.tie.cl

José Cembrano

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,
Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile
jcembrano@ucn.cl

Armando Siña

División Codelco Norte, Dirección de Desarrollo Geología y
Geotecnia Av. Tocopilla Duplex 157, Chuquicamata, Chile
asina@codelco.cl

Peter Stedman

BHP-Billiton Oigaland 15, 2591 JA
La Haya, Holanda
peter.stedman@bhpbilliton.com

Gonzalo Yáñez

Codelco Chile, Gerencia de Exploraciones,
Teatinos 258 piso 7, Santiago, Chile
gyane003@stgo.codelco.cl

El comentario en cuestión objeta fuertemente el método científico utilizado en el artículo, de manera que es difícil enriquecer el debate sobre el tema de fondo puesto que no se trata de un comentario que discuta los aspectos sustantivos de las hipótesis planteadas, ni propone hipótesis alternativas sobre la base de datos propios, sean éstos publicados o en elaboración. Asimismo, lamentamos que el comentario no se refiera a la originalidad de la hipótesis ni a la eventual contribución, por modesta que ella sea, a la comprensión de un problema fundamental como es la génesis de los yacimientos gigantes tipo pórfido cuprífero.

La mayor parte de las objeciones a la metodología adoptada, la calidad de los datos, y la sustentabilidad de las interpretaciones en los datos, nos parecen opiniones legítimas pero inapropiadas para ser tratadas en una sección de comentarios y

réplicas en una Revista Científica de corriente principal. En efecto, dichos aspectos metodológicos fueron ya sancionados por los revisores del artículo y por el Editor, quienes obviamente estimaron que el artículo satisfacía los requerimientos de rigurosidad científica que ameritaban su publicación, más allá de si hay divergencias de opinión acerca de la validez y aceptación universal de los métodos utilizados. Por último, y antes de abordar de manera detallada los comentarios específicos, queremos enfatizar que nuestro objetivo fue refrescar el ambiente científico con una hipótesis original que intenta integrar los procesos tectónicos de primer orden con la evolución magmática e hidrotermal de los sistemas metalogénicos. No está de más recordar que en Geología, como en otras ciencias naturales, los datos siempre son insuficientes puesto que la mayoría de los procesos geológicos no son

TABLA 1. BASE DE DATOS GEOQUÍMICOS DE ROCAS ÍGNEAS DEL 'SEGMENTO METALOGÉNICO DE CHILECENTRAL', USADA EN ESTE TRABAJO.

Ubicación/Unidad	Muestra No.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	FeO %	MgO %	MnO %	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	L.O.I. %	Age (Ma)	Edad Est. de Oxi. Tipo ¹ (Fe ₂ O ₃ /FeO)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr Razón Inicial	Referencias	
El Teniente	PVF2 ²	55.40	17.60	7.10	1.80	3.65	3.10	4.30	4.50	0.12	0.28	1.12	0.10	2.3	A	0.72	0.704870	Stern y Skewes, 1995
El Teniente	PVF1 ²	56.50	16.90	7.20	2.10	3.63	2.70	5.10	4.80	0.12	0.33	1.10	0.68	2.3	A	0.53	0.704850	Stern y Skewes, 1995
El Teniente	7ic9	61.00	16.80	5.60	2.50	4.38	3.90	2.20	2.80	0.10	0.20	0.75	0.94	6.2	A	1.77	0.703960	Stern y Skewes, 1995
El Teniente	7ic10	61.50	16.90	5.70	2.50	4.54	3.60	1.90	2.60	0.08	0.22	0.77	0.69	6.6	A	1.89	0.703900	Stern y Skewes, 1995
El Teniente	7ic5	53.70	17.10	3.90	2.20	4.93	1.90	2.40	1.50	0.08	0.21	0.39	1.80	7.1	A	0.79	0.703930	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	GDRB	55.60	16.20	3.30	3.20	4.48	1.60	2.80	2.60			0.45	0.10	11.7	A	0.62	0.704000	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	CHDac ³	70.90	15.20	0.33	5.20	3.63	2.20	0.59	0.36			0.13	1.50	4.8	A	3.73	0.704460	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	PDL ¹	58.70	15.70	0.73	4.80	4.70	1.10	0.59	0.48			0.14	2.00	4.9	A	1.86	0.704410	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	PCM ¹	66.10	15.60	2.10	3.95	5.40	1.57	2.63	1.59			0.13	0.90	5.2	A	0.60	0.704410	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	An1 ¹	62.10	16.10	0.32	6.60	2.10	5.40	2.50	1.80			0.28	2.50	16.0	A	2.16	0.703810	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	An2	56.20	16.90	5.30	2.90	3.10	4.70	4.60	4.70			0.78	0.90	18.0	A	1.02	0.703820	Stern y Skewes, 1995
Río Blanco-Los Bronces	LB-3	60.50	16.80	5.42	2.22	4.60	2.08	3.00	3.05	0.09	0.20	0.65		18.5	A	0.69	0.703870	Wamaars et al., 1985
Río Blanco-Los Bronces	LB-2	65.30	15.80	3.04	3.55	4.68	1.20	2.41	1.53	0.08	0.15	0.46		11.3	A	0.50	0.703910	Wamaars et al., 1985
Río Blanco-Los Bronces	LB-7	63.06	15.40	1.74	2.95	4.24	3.65	1.41	3.43	0.08	0.24		0.27	7.9	A	2.59	0.704440	Wamaars et al., 1985
Río Blanco-Los Bronces	LB-10	67.80	15.70	2.52	2.57	4.38	0.83	0.83	0.33	0.11	0.23		1.67	4.9	A	1.00	0.704440	Wamaars et al., 1985
Río Blanco-Los Bronces	LB-11 ¹	69.50	15.50	1.75	2.43	4.76	0.63	0.91	0.41	0.02	0.26		0.85	4.8	A	0.69	0.704520	Wamaars et al., 1985
Los Pelambres	A11219	66.00	16.50	2.59	2.93	5.18	1.48	1.40	1.21	0.01	0.14	0.51	1.30	9.0	A	1.06	0.704000	Sillitoe (1973)
Puico-Volcán	A05571	62.56	15.97	4.49	3.08	4.05	2.08	2.96	2.41	0.09	0.14	0.72	0.38	18	R	0.70		Este trabajo
Puico-Volcán	A05572	65.27	14.39	2.25	4.27	4.48	4.15	2.12	0.89	0.13	0.25	0.95	0.50	8	R	1.86		Este trabajo
El Teniente	KET-146	63.31	16.50	4.64	2.61	3.55	2.78	1.57	1.96	0.08	0.14	0.56		7.8	A ¹	1.77	0.703920	Este trabajo
El Teniente	KET-144	63.38	16.29	4.67	2.68	3.55	2.74	1.81	2.01	0.08	0.14	0.56		6.5	R	1.70		Este trabajo
El Teniente	KET-25 ¹	63.70	17.54	3.71	2.86	4.34	4.06	0.49	1.38	0.10	0.19	0.57		12.3	A ¹	8.29	0.704191	Este trabajo
El Teniente	K-1	65.33	17.11	2.81	2.47	5.18	3.54	1.50	1.45	0.05	0.14	0.40		6.5	R	2.38		Este trabajo
El Teniente	K-2	66.07	15.79	2.27	3.17	5.68	3.51	1.34	0.96	0.10	0.22	0.88		6.5	R	2.62		Este trabajo
El Teniente	E/1359	67.46	16.17	2.95	3.06	4.65	2.94	1.10	1.12	0.05	0.12	0.36		6.5	R	2.67		Este trabajo
Río Blanco-Los Bronces	79037402	65.91	15.65	3.48	3.10	4.47	1.87	1.76	1.70	0.05	0.15	0.53		5	R	1.06		Este trabajo
Zona Volcánica Sur	MP-11 ¹	75.80	13.33	0.45	3.85	4.29	0.69 ⁴	0.19				0.15		0.01	R		0.705910	Futa y Stern, 1988
Zona Volcánica Sur	MP-8 ¹	53.99	18.24	8.36	1.31	3.70	7.71 ⁴	4.51				1.32		0.01	A		0.704920	Futa y Stern, 1988
Zona Volcánica Sur	MA-1 ¹	57.05	17.72	7.10	2.11	3.55	6.53 ⁴	4.34				1.01		0.01	R		0.704810	Futa y Stern, 1988
Zona Volcánica Sur	T-1 ¹	62.15	17.38	5.20	2.58	3.90	4.63 ⁴	2.58				0.79		0.01	R		0.704740	Futa y Stern, 1988

Nota. Las muestras con su identificación en cursivas son las que califican para considerar su razón Fe₂O₃/FeO como medida de su estado de oxidación magnético.

¹ Tipo de edad: A: edad absoluta (edad radiométrica); R: edad relativa (relaciones geológicas de terreno).

² Muestras que no califican para ser considerada su razón Fe₂O₃/FeO como medida del estado de oxidación magnético.

³ Muestras consideradas sólo como referencia.

⁴ Muestras analizadas con el método K-Ar del Proyecto Geodinámico, Corporación del Cobre, División El Teniente, Santiago, Chile.



FIG. 1. El diagrama indica la evolución del estado de oxidación de las 20 muestras que no presentan evidencias geoquímicas de alteración

observables ni reproducibles de manera directa, y la interpretación ocurre incluso desde la toma 'objetiva' de los datos. Por tal razón, si bien reconocemos una relativa debilidad de la base de datos utilizada, creemos que hay un esfuerzo riguroso de constreñir nuestras interpretaciones con las escasas observaciones geológicas disponibles. Será tarea de otros, con una aproximación o metodología más apropiada (*e.g.*, Ballard *et al.*, 2002), el confirmar o rechazar las ideas rudimentariamente expresadas en este artículo, cuya validez creemos no se ve afectada por las precisiones metodológicas del colega Munizaga.

A continuación intentamos responder lo medular del comentario referido:

Es conocido que la medida del estado de oxidación magmático por medio de la razón $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ proveniente de análisis de roca total, es sensible a los procesos de alteración hidrotermal y meteorización (*e.g.*, Ishihara, 1981; Wilt, 1995; Ballard *et al.*, 2002). Por esto, para estudiar el estado de oxidación magmático por medio de la razón referida es más importante la calidad de los datos que la

cantidad. En atención a esto último y, con el objeto de utilizar un criterio científico en el análisis de los datos del estado de oxidación presentados en el trabajo en discusión, se realizó un filtrado de los datos disponibles, considerándose sólo las rocas ígneas no afectadas por alteración hidrotermal ni meteorización según los criterios cuantitativos propuestos por Wilt (1995). Esto se explica detalladamente en las p. 45 y 46 del trabajo en cuestión.

De esta manera, se excluyeron del análisis las siguientes muestras (ver Tabla 1 adjunta): CHDac (por presentar evidencias de alteración potásica y alteración de sus filosilicatos; Alteration Index), An1 (por no cumplir con los siguientes filtros: L.O.I. ≥ 2.5 ; A/CNK y Ishikawa Index), PDL, PQM, LB-11 (presentan fuerte alteración potásica) y KET-25 (si bien es cierto que esta muestra pasó los filtros de alteración es un valor sospechoso). Las muestras MP-11, MP-8, MA-1 y T-1 sólo presentan FeO total y, por lo tanto, no fueron consideradas en la medida del estado de oxidación, pero sí por sus valores de razones iniciales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

El diagrama adjunto indica la evolución del estado de oxidación de las 15 muestras que no presentan evidencias geoquímicas de alteración. Además, se indica el nombre correspondiente a cada muestra. Las muestras PVF1 y PVF2, efectivamente, corresponden a rocas ígneas extrusivas, sin embargo, al cumplir con los criterios de muestras sin evidencias geoquímicas de alteración, pareció razonable considerarlas solo como referencia. No obstante esto último, estas muestras no inciden de manera alguna en las conclusiones del trabajo en discusión.

En el diagrama referido se agregó valores de referencia de estado de oxidación, medido con igual metodología que en el trabajo en discusión. Estos valores corresponden a rocas ígneas provenientes del área de Chuquicamata y un promedio de 572 análisis provenientes de rocas ígneas de edad Mesozoica-Cenozoica del Japón publicados en Ishihara *et al.* (1984).

Ahora bien, con respecto a la asignación cronológica citada en el trabajo discutido y graficadas en el diagrama precedente se sustentó en: dataciones radiométricas (11 de las 18 muestras utilizadas para caracterizar el estado de oxidación cuentan con dataciones radiométricas) y, en edades relativas (7 muestras). Dentro de estas 7 se encuentran las muestras K-1, K-2 y E-1359 que corresponden a cuarzo dioritas provenientes del 'stock' diorítico ubicadas al sur-este del yacimiento El Teniente y la muestra KET-144 correspondiente a un pórfido dacítico ubicada en el entorno del mismo yacimiento. Los estudios geocronológicos realizados en el yacimiento El Teniente por Cuadra (1986)

y Maksaev *et al.* (2002) (en prep.) hacen razonable considerar una edad relativa de 6,5 Ma para estas rocas. La muestra 79031402 corresponde a una granodiorita de hornblenda y biotita ubicada en la mina Río Blanco-Los Bronces que estudios geocronológicos discutidos en Warnaars *et al.* (1985) y Serrano *et al.* (1996) permiten, razonablemente, asignarle una edad de 5 Ma. Finalmente, a las muestras A05571 y A05572 que corresponden a granodioritas ubicadas en el área de Peuco-Volcán, al norte del yacimiento El Teniente, se asignó a la primera una edad de 18 Ma por relaciones geológicas de terreno con el grupo de plutones caracterizado por el plutón La Obra (19,6-16,2 Ma, in Kurtz *et al.*, 1997) y, a la segunda, una edad de 8 Ma por relaciones geológicas de terreno con el grupo de plutones caracterizados por los plutones Carlota y Río Cortaderal (9-7 Ma, in Kurtz *et al.*, 1997).

Finalmente, cabe mencionar que trabajos publicados con posterioridad al discutido aquí confirman la importancia del estado de oxidación magmático en la génesis de los depósitos minerales (Mungall, 2002) y, también, confirman un aumento del estado de oxidación de los magmas relacionados con los procesos de mineralización en los pórfidos cupríferos Eoceno-Oligoceno ubicados en el segmento andino comprendido entre los 25 y 20°S (Ballard *et al.*, 2002). Todo esto, nos reafirma que el elevado estado de oxidación de los magmas emplazados en un ambiente de acortamiento regional, habría jugado un rol significativo en la génesis de los pórfidos cupríferos miocenos ubicados en el segmento andino comprendido entre los 31 y 34°S.

REFERENCIAS

- Ballard, J.; Palin, J.M.; Campbell, I. 2002. Relative oxidation state of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircons: application to porphyry copper deposits in northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 144, No. 3, p. 347-364.
- Cuadra, P. 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 27, p. 3-26.
- Ishihara, S. 1981. The Granitoid Series and Mineralization. *Economic Geology*, Vol. 75th Anniversary, p. 458-484.
- Ishihara, S.; Ulriksen, C.; Sato, K.; Terashima, S.; Sato, T.; Endo, Y. 1984. Plutonic Rocks of North-Central Chile. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, Vol. 35, No. 11, p. 503-536.
- Mungall, J.E. 2002. Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, Vol. 30, p. 915-918.
- Kurtz, A.; Kay, S.; Charrier, R.; Farrar, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente Region, central Chile (34-35° Sur). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 24, No. 1, p. 73-90.
- Serrano, L.; Vargas, R.; Stambuk, V.; Aguilar, C.; Galeb, M.; Holgrem, C.; Contreras, A.; Godoy, S.; Vela, I.; Skewes, A.; Stern, C.R. 1996. In Andean Copper Deposits: new discoveries, mineralization, styles and

- metallogeny (Camus, F.; Sillitoe, R.H.; Petersen, R.; editors). *Society of Economic Geologists*, Special Publication No. 5, p. 119-130.
- Sillitoe, R.H. Geology of the Los Pelambres Porphyry Copper Deposit. *Economic Geology*, Vol. 68, No. 1, p. 1-10.
- Wamaars, F.W.; Holmgren, C.; Barassi, S. 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Río Blanco, Chile. *Economic Geology*, Vol. 80, p. 1544-1565.
- Witt, J. 1995. Correspondence of alkalinity and ferric/ferrous ratios of igneous rocks associated with various types of porphyry copper deposits. *In* Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera (Pierce, F.W.; editor *et al.*). *Geological Society*, Digest 20, p. 180-200. Tucson, Arizona.
-