

DISTRIBUCION GEOQUIMICA DE ESTAÑO Y BORO EN LA SECUENCIA PALEOZOICA INFERIOR DE LA CORDILLERA REAL DE BOLIVIA

Bernd Lehmann¹⁾, Ulrich Petersen²⁾, Reynaldo Santiváñez³⁾ y Lothar Winkelmann⁴⁾

1) Institut für Angewandte Geologie, Michernstr.16, D-1000, Berlin-33, RFA

2) Department of Geological Sciences, Harvard University, 20 Oxford Street, Cambridge, Mass. 02138, USA

3) Departamento de Geología (UNSA), Casilla 23698, La Paz, Bolivia

4) Coop. Minera Peruano Alemana (INGENMETOBER), Casilla 10-1374, Lima, Perú

Resumen

Un perfil geoquímico, que atraviesa la secuencia sedimentaria del paleozoico inferior de la faja estañífera boliviana, muestra valores promedio para estaño y boro (4 ppm de Sn y 105 ppm de B). Estos datos se oponen al modelo metalogénico según el cual los granitos estañíferos bolivianos heredaron sus contenidos anómalos de Sn y B de su roca encajonante paleozoica inferior.

Abstract

A geochemical cross-section through the Lower Paleozoic sediment sequence of the Bolivian tin belt indicates average tin and boron contents (4 ppm Sn and 105 ppm B). A metallogenic model of heritage of the anomalous Sn and B contents of the Bolivian tin granites from their Lower Paleozoic country rocks is not supported.

INTRODUCCION

La provincia estañífera boliviana, coincide estrechamente con el rumbo y la extensión del Paleozoico inferior sedimentario de los Andes orientales. Los yacimientos de estaño están genéticamente relacionados, por una parte, con intrusiones graníticas de edad Triásica (granitos estañíferos en el norte de Bolivia) y, por otra parte, con intrusiones subvolcánicas Terciarias de composición dacítica a latítica (pórfidos estañíferos en el centro y sur de Bolivia) (GRANT et al, 1979; Mc BRIDE et al, 1983). La roca de caja de esas intrusiones estañíferas, consiste de una secuencia clástica cuya edad abarca del Ordovícico infe-

rior hasta el Devónico inferior. Esta secuencia alcanza un espesor de hasta 10000m (AHLFELD & SCHNEIDER-SCHERBINA, 1964).

Las rocas graníticas de la provincia estañífera boliviana, contienen valores definitivamente anómalos de Sn y B en comparación a granitos promedio. Valores de estaño y boro de algunos granitos de la Cordillera Real, alcanzan aproximadamente 20 ppm Sn y 165 ppm B (LEHMANN, 1979; WINKELMANN, 1983). Las rocas alteradas hidrotermalmente presentan valores mucho más altos y la especialización geoquímica de los granitos se refleja en una paragénesis ubicua de casiterita y turmalina en los yacimiento de estaño.

En secciones delgadas de rocas cuarcíticas del Paleozoico inferior, se ha detectado turmalina detritica, y los pocos datos de boro de un área limitada al norte de La Paz indican valores anómalos comparados con areniscas promedio (LEHMANN, 1979). Los datos por Sn no revelan ninguna anomalía.

Varios autores habían sugerido que los altos contenidos de estaño y boro, de las rocas ígneas mesozóicas y terciarias, podrían haber sido heredados de su roca sedimentaria encajonante (FLEISCHER & ROUTHIER 1970, SCHNEIDER 1975; SCHNEIDER & LEHMANN 1977). Para la comprensión de la metalogénesis de la provincia estañífera boliviana, es esencial conocer si en la secuencia paleozoica inferior existen anomalías de Sn y B.

Un estudio regional de la distribución geoquímica de estaño y boro podría resolver la interrogante de una posible herencia de anomalías sedimentarias en intrusiones magmáticas posteriores, o su redistribución por células de convección hidrotermal relacionadas a dichas intrusiones (PETERSON 1979). Como un primer paso, se ha estudiado un perfil geoquímico que atraviesa la secuencia estratigráfica de la Cordillera Real, entre la Paz y Coroico (Las Yungas, Fig.1).

MARCO GEOLOGICO

El perfil geoquímico antes mencionado, tiene 50 km de longitud y se extiende perpendicularmente al rumbo general de los Andes. Dicho perfil tiene un relieve topográfico de 3700 m, con su punto más alto (La Cumbre, 4700 m), al oeste de la Paz, que combinado con un suave buzamiento de las rocas sedimentarias hacia el oeste permite obtener afloramientos excepcionales, con un espesor de aproximadamente 5600m para la columna estratigráfica.

En su parte inferior, la secuencia estratigráfica se compone de 1000 m de lutitas oscuras del Ordovícico medio (Llanvirniano), seguidos de 3000 m de lutitas, limolitas y areniscas cuarcíticas, de edades Llandelliana y Caradociana (Formación Unduavi). Diamictitas del Llandoveryano (Formación Cancañiri o Zapla) con un espesor alrededor de 250 m se superponen pseudoconcordantemente a dicho complejo Ordovícico. La secuencia sigue con 650 m de lutitas negruzcas (Formación Uncía), y con 700 m de una intercalación de estratos cuarcíticos y arcillas esquistosas de edad Ludlowiano (Formación Catavi). El paleozoico sedimentario sufrió un metamorfismo regional de bajo grado durante el ciclo hercínico. Un termometamorfismo débil se ha desarrollado alrededor de varias intrusiones discordantes de granitos estañíferos.

La secuencia Paleozoica inferior de la Cordillera Real, ha sido interpretada como correspondiente a depósitos de una cuenca intracratónica bajo condiciones de aguas someras ubicada entre el escudo brasilero en el Este y, el macizo Precámbrico del Altiplano (o macizo de Arequipa) en el Oeste (SCHLATTER & NIEDERLOF, 1966; ISAACSON 1975). Las fuentes principales de aporte sedimentario estaban situadas en el macizo del Altiplano. Informaciones más detalladas sobre la geología local y regional, se obtienen de MARTINEZ et al, 1971; LEHMANN, 1979; MARTINEZ, 1980; WINKELMAN, 1983 y TISTL, 1985.

DETERMINACION DE MUESTRAS DE ROCA Y DATOS ANALITICOS

La columna estratigráfica investigada está constituida por una serie clástica monótona (Fig. 2). Sus principales características composicionales son los ensambles, relativamente maduros, de cuarzo y filosilicatos (moscovita/sericita, clorita, biotita), con menores proporciones de feldespatos y fragmentos de roca. Los carbonatos detriticos son escasos. Esas caracte-

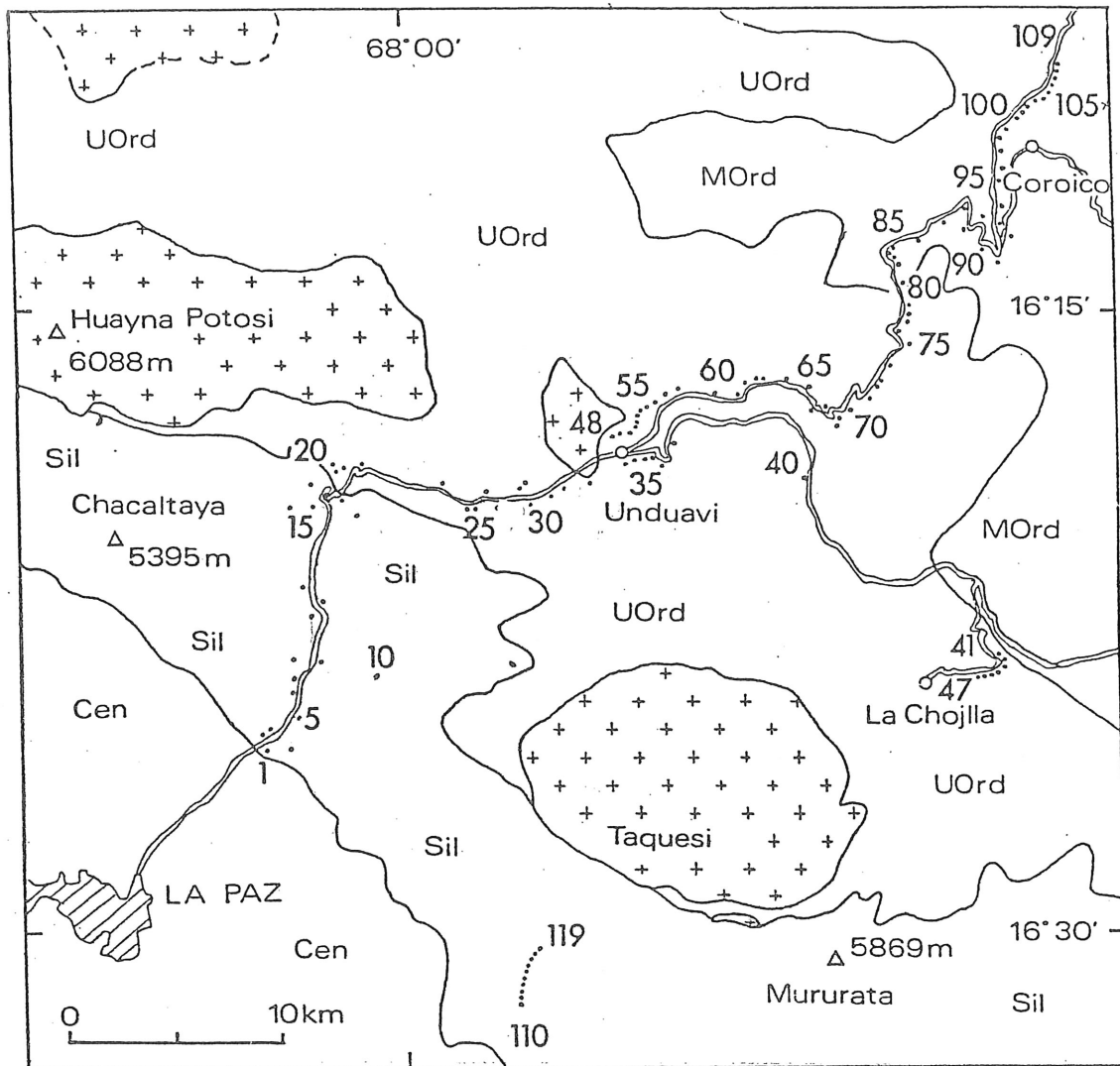


FIG. 1 Mapa de ubicación de muestras. Cen = Cenozoico; Sil = Siluriano; UOrd = Ordovico Superior; MOrd = Ordovico Medio; áreas con cruces = intrusiones graníticas.

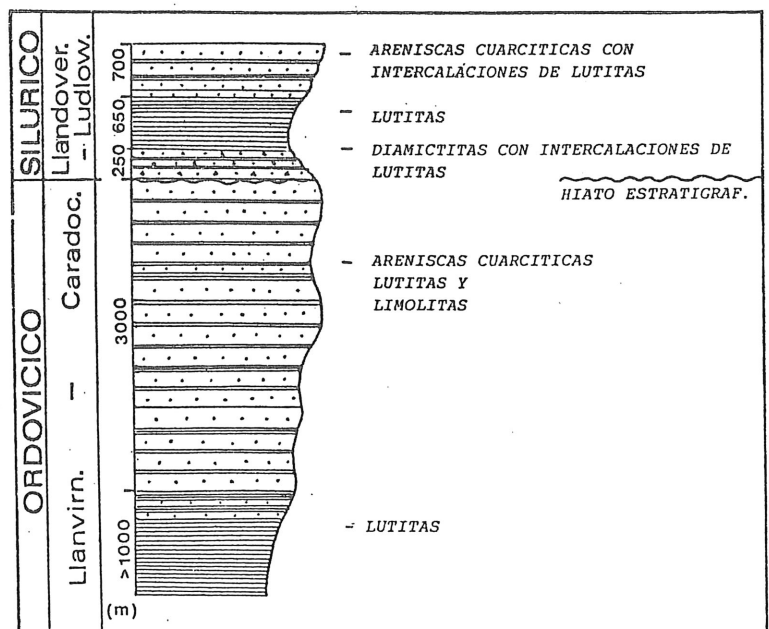


FIG. 2 Sección estratigráfica del área investigada.

TABLA 1. DATOS GEOQUIMICOS. Q = ARENISCA CUARCITICA. SH = LUTITA. QSH = ROCA LAMINADA ARENOSA-ARCILLOSA ESQUISTOSA. SIT = LIMOLITA

MUESTRA	LITOLOGIA	B (ppm)	Sn (ppm)	MUESTRA	LITOLOGIA	B (ppm)	Sn (ppm)
001	Q	170	16	036	Sit	100	2
002	Q	90	5	037	Sit	55	4
003	Q	65	9	038	Q	< 30	3
004	Q	175	4	039	QSh	100	1
005	Sh	--	4	040	QSh	115	4
006	Q	65	5	041	Sit	115	4
007	Sh	--	4	042	Sit	155	7
008	Sh	--	4	043	Sit	140	6
009	Q	--	3	044	Sit	100	6
010	Sh	175	4	045	Sit	140	5
011	Q	30	5	046	Sit	140	4
012	Sh	75	3	047	Sit	140	5
013	QSh	90	9	048	Sit	120	3
014	Sh	--	4	049	Q	100	4
015	Sh	--	5	050	Q	< 30	6
016	Q	--	2	051	Sit	100	3
017	Sh	--	3	052	Q	75	2
018	Sit	--	4	053	QSh	75	2
019	Q	< 30	2	054	Sit	100	2
020	QSh	65	4	055	Sit	100	2
021	Sit	90	4	056	Sit	100	8
022	Sit	55	6	057	Sit	100	6
023	Q	< 30	20	058	Sit	130	8
024	Q	< 30	3	059	QSh	140	5
025	Sit	75	3	060	QSh	155	6
026	Q	< 30	4	061	Sit	180	7
027	Sit	140	3	062	Sit	180	9
028	Q	< 30	3	063	Sit	180	7
029	QSh	40	6	064	Sit	240	6
030	QSh	100	3	065	Sit	180	7
031	Sit	115	11	066	QSh	65	3
032	QSh	180	9	067	QSh	180	2
033	Sit	140	4	068	QSh	180	3
034	Q	140	4	069	QSh	115	5
035	Q	< 30	4	070	Q	40	11

TABLA 1 CONTINUACION

MUESTRA	LITOLOGIA	B (ppm)	Sn (ppm)
071	QSh	115	4
072	Q	55	4
073	Q	< 30	1
074	Q	< 30	5
075	Q	30	5
076	Q	90	15
077	Q	40	10
078	Q	65	6
079	Q	< 30	8
080	Sh	100	6
081	QSh	100	9
082	Q	65	3
083	Q	75	4
084	Q	30	3
085	Sit	140	4
086	Sit	140	4
087	Sit	115	7
088	Sh	155	5
089	Sh	180	2
090	Sh	210	< 1
091	Sh	180	3
092	Sh	155	4
093	Sh	180	2
094	Sh	180	5
095	Sh	115	4
096	Sh	140	5
097	Sh	115	4
098	Sh	140	2
099	Sh	100	3
100	Sh	100	4
101	Sh	115	4
102	Sh	140	3
103	Q	55	3
104	Sh	140	4
105	Sh	115	5

MUESTRA	LITOLOGIA	B (ppm)	Sn (ppm)
106	Sh	120	4
107	Sh	140	4
108	QSh	90	3
109	Sh	90	2
110	Q	40	2
111	Q	180	3
112	Q	155	3
113	Q	140	4
114	Q	90	3
115	Q	180	2
116	Q	115	4
117	Q	100	3
118	Q	90	2
119	Q	140	1

rísticas composicionales y texturales llevaron a la determinación de cuatro tipos de roca: lutitas (Sh), limolitas (Sit), areniscas cuarcíticas (Q) y rocas arenoso-arcillosas esquistosas (QSh).

Las lutitas son rocas fisibles de grano fino. Su color gris oscuro se debe a contenidos moderados de material orgánico y/o sulfuros de hierro. Los filosilicatos son predominantes y el cuarzo llega sólo aproximadamente al 20% vol. La limolita es una variedad masiva de esa lutita, de grano ligeramente más grueso.

Las areniscas cuarcíticas son de color gris-marrón. Componentes micáceos, partículas de feldespatos y fragmentos de roca están cuantitativamente subordinados al cuarzo (60 - 80% vol.). La matriz es arcillosa o silícea y frecuentemente está acompañada por óxidos de hierro secundarios. Pirita autígena, zircón y turmalina detritica aparecen como minerales accesorios. La roca arenoso-arcillosa esquistosa representa una intercalación laminar de los materiales lutítico y arenoso ya

des critos. Estos tipos principales de roca ocurren en facies recurrentes en toda la secuencia del paleozoico inferior. Descripciones adicionales sobre el ambiente deposicional y la petrografía han sido realizados por LEHMANN (1979) y WINKELMANN (1983).

Los resultados geoquímicos están reunidos en la tabla No. 1. Ciento diecinueve muestras de mas o menos 1 kg cada una, fueron molidas y analizadas por Sn y B. El estaño ha sido detectado por el método de fluorescencia de rayos X (corrección de matriz por la técnica "background scatter ratio"), en el Hahn-Meitner Institute for Nuclear Research, Berlin. El boro a su vez, fue analizado por espectrografía de emisión óptica en el Servicio Geológico de Bolivia (Geobol), La Paz. Para la calibración de ambos elementos, se ha aplicado estándares de roca sintética e internacionales (USGS G-2 y W-1; ZGI GM y TB). Los datos de

FIG. 3 Distribución de frecuencias del estaño (n=119). Areas achuradas representan muestras de arenisca cuarcítica.

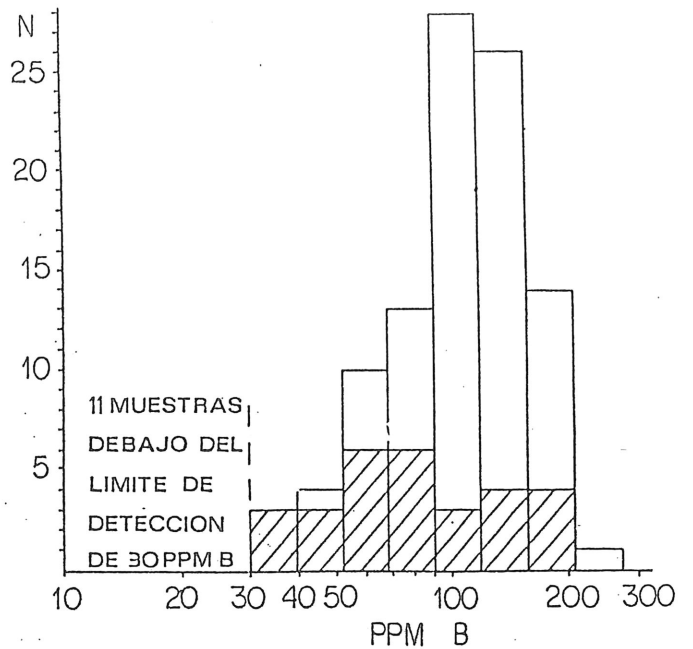
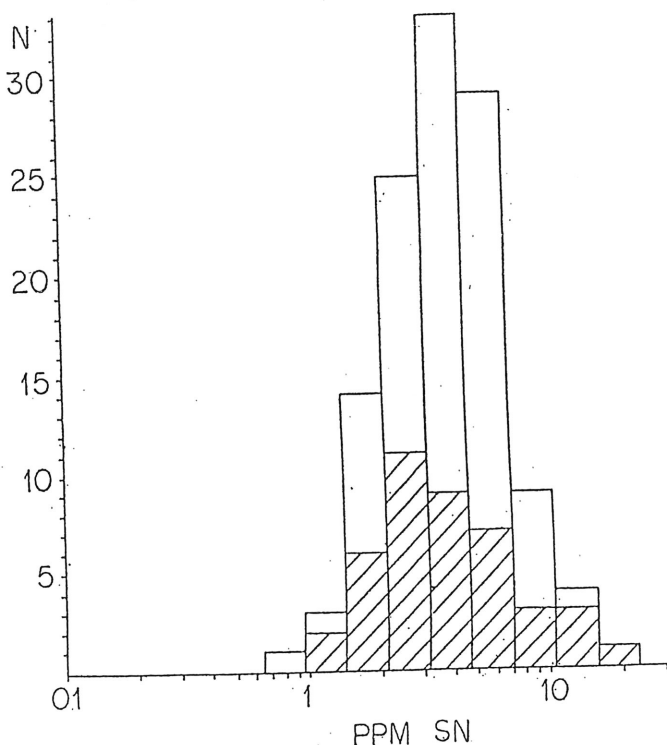


FIG. 4 Distribución de frecuencias del boro (n=110). Areas achuradas y 11 muestras por debajo del limite de detección de 30 ppm B, representan muestras de areniscas cuarcíticas.

boro de algunas muestras fueron controlados en la República Federal de Alemania por la BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover). Ambos laboratorios dieron resultados con una variación máxima de hasta 25%. El grado de precisión de datos de Sn y B se estima, para concentraciones muy bajas, en aproximadamente mas o menos 30% y para las más altas en mas o menos 20%. El histograma de la Fig. 3 describe la distribución de frecuencia log-normal de los datos de estaño. El promedio geométrico para todas las muestras de roca está alrededor de 4 ppm Sn. Las rocas cuarcíticas tienen un promedio ligeramente mas bajo de aproximadamente 3.5ppm Sn, con una varianza relativamente grande.

La Fig. 4 muestra una distribución de boro fuertemente sesgada, debido a una superposición de dos diferentes poblaciones de boro respecto de la roca arenosa y arcillosa. Todas las muestras en conjunto dan un valor promedio de 105 ppm B como se dedujo mediante un gráfico de probabilidad.

La población de las lutitas tiene un promedio de 130 ppm B, mientras que las areniscas cuarcíticas ofrecen un promedio de 60 ppm B con una varianza extrema. No existe correlación lineal entre los datos de B y Sn.

Adicionalmente, 40 muestras fueron analizadas por tierras raras (REE), Zr, Hf, W, Sb, Th y U mediante activación neutrónica (Hahn-Meitner Institute for Nuclear Research, Berlin). Tales resultados no son detallados en este trabajo, pero se les resume de la siguiente forma:

1. El contenido de Zr en las cuarcitas llega hasta 666 ppm y en lutitas está entre 157 y 384 ppm. El cociente promedio de Zr/Hf es aproximadamente 35.
2. Los valores de Th son de aproximadamente 8 ppm (2.5-11 ppm) en las cuarcitas y de 16 ppm (10-19 ppm) en las lutitas.
3. El uranio en las cuarcitas está alrededor de 2 ppm (1-4 ppm) y en las lutitas alrededor de 3 ppm (1-6 ppm).
4. El modelo de la distribución de las REE corresponde a rocas corticales promedio (Fig. 5)
5. El tungsteno en las cuarcitas está alrededor de 2 ppm (1,2 - 3 ppm) y en las limolitas en 4 ppm (2,7 - 5,7 ppm). Las muestras de lutitas no han sido analizadas por W.

CONCLUSIONES

Los promedios geométricos de los valores de Sn y B en las muestras investigadas son de 4 ppm Sn y 105 ppm B. Esos datos corresponden a una secuencia promedio de lutitas y areniscas (WEDEPOHL 1967, 1969; ROSLER & LANGE 1976). Por lo tanto, la secuencia paleozóica inferior en su conjunto no representa ninguna anomalía de estaño o boro.

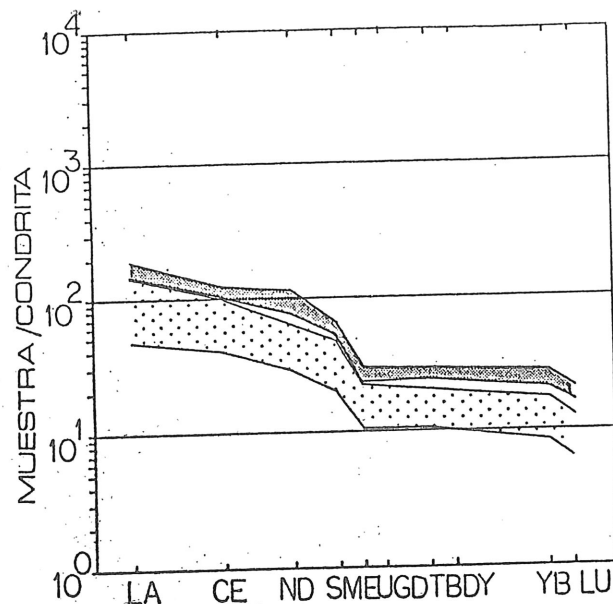


FIG. 5 Patrones de distribución de muestras de lutitas (campo superior oscuro) y muestra de cuarcita (campo inferior punteado). Las muestras de limonitas se ubican entre ambos campos.

Los resultados obtenidos en la provincia estañífera del Erzgebirge/RDA, contrastan notablemente con los datos presentados. WEINHOLD (1977) encontró un "background" regional de 68 ppm Sn en la roca encajonante de los granitos estañíferos del Erzgebirge (véase también LEHMANN & SCHNEIDER 1981). BAUMANN & TISCHENDORF (1978) determinaron en la misma región un contenido de 150 ppm de SnO₂ detrítico en rocas cuarcíticas del Precámbrico. Una situación similar se conoce en el sur de China (provincias de Hunan, Jiangxi, Guangdong y Guangxi), donde toda la secuencia sedimentaria, desde el Proterozoico al Pérmico, parece estar especializada en estaño y tungsteno (LIU YINGJUN et al, 1984). Nuestra investigación no sustenta la tesis de una "provincia geoquímica" según ROUTHIER, 1980; ("domaine/aire métallique").

Sin embargo, existen muestras de areniscas cuarcíticas con valores anómalos de Sn y B (Sn hasta 20 ppm y B hasta 180 ppm). No está claro si esas muestras han sido afectadas hidrotermalmente. Especialmente en rocas cuarcíticas quebradizas, las aureolas hidrotermales se extienden por varios kilómetros mas allá de las intrusiones magmáticas (LEHMANN 1979). Sin embar-

go, las secciones delgadas de las muestras anómalas (metaareniscas de grano fino) no presentan indicaciones claras de alteración hidrotermal. Pero si se acepta un origen sedimentario de esas anomalías (que representan el 3 - 5% de la población de muestras), es difícil entender cómo estos enriquecimientos menores podrían haber contribuido sustancialmente a la especialización geoquímica de los granitos estañíferos (que representan el 15% del área de la Cordillera Real) y a la asociación de turmalina y casiterita en los yacimientos de estaño en Bolivia.

Los resultados de este trabajo sugieren que el estaño y el boro de los yacimientos hidrotermales bolivianos están genéticamente relacionados con los granitos estañíferos, lo cual quiere decir que estos elementos son de origen magmático. Sin embargo, es posible que los granitos pudieran haber heredado sus contenidos anómalos de estaño y boro, de rocas sedimentarias o ígneas más antiguas (presumiblemente Precámbricas) que se encuentran a mayor profundidad y que estarían enriquecidas en tales elementos en particular. También cabría la posibilidad que el presente estudio no haya detectado enriquecimientos de Sn y B estratigráficamente muy restringidos. Se requiere más investigación sobre las distribuciones regionales de los elementos, lo que hasta la fecha ha sido algo descuidado dentro de los estudios metalogénicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido auspiciado parcialmente por el Research Development Program of the International Union of Geological Sciences. Se agradece los comentarios críticos de Marco Enaudi y la colaboración de Peter Dulski por los datos de activación neutrónica.

REFERENCIAS

- AHLFELD, F., SCHNEIDER-SCHERBINA, A. (1964) "Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia" : Bol. Nac. Geol. 5 (Especial), La Paz, 1-388.
- BAUMANN, L., TISCHENDORF G. (1978) "The metallogeny of tin in the Erzgebirge" : Stenprok M., Burnol L., Tischendorf G., Eds., Metallization associated with acid magmatism, Vol. 3, 17-28, Praha: Czech. Geol. Surv.
- FLEISCHER, R., ROUTHIER, P. (1970) "Quelques grands thèmes de la géologie du Brésil : Miscellanées géologiques et metallogéniques sur le Planalto" : Sci. Terres 15, 45-102.
- GRANT, J.N., HALLS, C., AVILA, S.W., SNELLING, N.J. (1979) "K-Ar ages of igneous rocks and mineralization in part of the Bolivian tin belt" : Econ. Geol. 74, 838-851.
- ISAACSON, P.E. (1975) "Evidence for a western extracontinental land source during the Devonian period in the Central Andes" : Geol. Soc. Amer. Bull. 86, 39-46.
- LEHMANN, B. (1979) "Schichtgebundene Sn-Lagerstätten in der Cordillera Real, Bolivien" : Berliner geowiss. Abh. (A) 14, 1-135.
- LEHMANN, B., SCHNEIDER H. J. (1981) "Stratabound tin deposits" : Wolf, K.H. Ed., Handbook of stratabound and stratiform ore deposits, 743-771, Amsterdam.
- LIU, YINGJUN; ZHANG, JINGRONG; SUN, CHENGYUAN; MA, DONGSHENG; QIAO, ENGUANG; CHEN, JUN (1984) "The geochemical characteristics of trace elements in granitic rocks of South China" : Xu Keqin, Tu Guangchi, Eds., Geology of granites and their metallogenic relations, 753-770, Beijing, Science Press.
- MARTINEZ, C. (1980) "Structure et évolution de la chaîne hercynienne et

de la chaîne andine dans le nord de la Cordillère des Andes de Bolivie" : 352 p., Paris: - ORSTOM.

MARTINEZ, C.; SUAREZ, R.; SUBIE-TA, T; (1971) "La cadena hercínica en la parte septentrional de la Cordillera Oriental de los Andes Bolivianos (Perfil La Paz-Alto Beni)": Bol. Serv. Geol. Boliv. 15, 26-35.

MC BRIDE, S.L.; ROBERTSON, R.C.R.; CLARK, A.H.; FARRAR, E. (1983) "Magmatic and metallogenetic episodes in the northern tin belt, Cordillera Real, Bolivia" : Geol. Rdsch. 72, 685-713.

PETERSEN, U. (1979) "Metallogenesis in South America: Progress and Problems" : Episodes 4, 3-11.

ROSLER, H.J.; LANGE, H. (1976) "Geochemische Tabellen" : 674 p., Stuttgart, Enke.

ROUTHIER, P. (1980) "Où sont les métaux pour l'avenir? Les provinces métalliques. Essai de métallogénie globale" : Mém. BRGM 105, 1-409.

SCHLATTER, L.E.; NEDERLOF, M.H. (1966) "Bosquejo de la geología y paleogeografía de Bolivia" : Bol. Serv. Geol. Boliv. 8, 1-49.

SCHNEIDER, H. J. (1975) "Ein neues genetisches Konzept für die sogenannte bolivianische Zinn-Silber-Provinz. Abstr. Intern.Kolloquium SGA, GBMB a. Com, Claustahl-Zellerfeld, April 1975, 1p.

SCHNEIDER, H.J.; LEHMANN B. (1977) : Contribution to a new genetical concept on the Bolivian tin province" : Klemm D.D., Schneider H.J., Eds., Time and stratabound ore deposits, 153-168, Berlin etc. - Springer.

TISTL, M. (1985) "Die Goldlagerstätten der nördlichen Cordillera Real/Bolivien und ihr geologischer Rahmen." Berliner geowiss. Abh. (A) 65, 1-102.

WEDEPOHL, H.H. (1967, 1969) "Handbook of geochemistry" : Vol. II/1 y II/4,5-A-1 hasta 5-0-10 y 50-A-1 hasta 50-M-5, Berlin etc. - Springer.

WEINHOLD, G. (1977) "Zur prävaristischen Vererzung im Erzgebirgskristallin aus der Sicht seiner lithofaziellen und geotektonisch-magmatischen Entwicklung während der assyntischkaledonischen Ära" : Freiburger Forschungsh. C 320, 1-53.

WINKELMANN, L. (1983) "Geologie und Lagerstätten im Bereich Palca (Mururata) und die Geochemie der Silursedimentite in der Cordillera La Paz/Bolivien" : Berliner geowiss. Abh. (A) 51, 1-110.