

COMENTARIO SOBRE LA DISTRIBUCION DE ELEMENTOS MENORES
Y TRAZAS (Ag, Bi, Hg, Se, Cd, In, Ge, Ga, Sn) EN LOS YACIMIENTOS DE
Pb-Zn DEL PERU CENTRAL

Pierre Soler *

* ORSTOM La Mariscal 115 Lima 27, Perú y 24 rue Bayard, 75008 París.

RESUMEN

Han sido analizadas 850 muestras procedentes de 40 yacimientos polimetálicos del Perú Central.

Los yacimientos estrato-ligados, sin volcanismo asociado, en la base del Mesozoico, muestran leyes notables de Ge y Cd. Los yacimientos volcano sedimentarios de la misma edad presentan leyes fuertes de In.

Dentro de los yacimientos genéticamente ligados al magmatismo andino terciario se distinguen :

- yacimientos de alta temperatura (skarns - yacimientos con skarns y filones) con altas leyes de Bi y Se. Forman un grupo geoquímicamente homogéneo.
- yacimientos filonianos mesotermales a epitermales muestran altas leyes de Ag, a veces Ge y leyes bajas de Bi, Ga, In. Forman un grupo poco homogéneo.

Los yacimientos encajonados en el Paleozoico o influenciados por éste, muestran abundancia de In, Ga, Sn, ley muy baja de Se y leyes relativamente bajas de Cd. Los yacimientos encajonados en el Mesozoico y el Cenozoico presentan leyes fuertes de Se y Cd y leyes bajas de In, Ga, Sn. Esa distribución permite hacer la hipótesis de un origen superficial de parte de los fluidos mineralizantes.

En comparación con otras provincias polimetálicas, la provincia peruana se caracteriza por altas leyes de In y bajas leyes de Ge.

ABSTRACT

850 samples from 40 polymetallic ore deposits of Central Peru have been analysed.

Stratabound ores, without associated volcanism, in the lower part of Mesozoic, show notable Ge and Cd contents. Volcano-sedimentary ores of the same age present high In content.

Among the ore deposits genetically linked to the andean tertiary magmatism, we distinguish :

- high temperature ores (skarns - complex ores with skarns and veins) with high Bi and Se contents. Form an homogeneous geochemical group.
- mesothermal to epithermal vein ores show high Ag content, some times high Ge content and low Bi, Ga and In contents. Form a little homogeneous geochemical group.

Ore deposits located in the Paleozoic or influenced by the Paleozoic, show high In, Ga and Sn contents, very low Se content and relatively low Cd content. Ore deposits located in the Mesozoic and the Cenozoic present high Se and Cd contents and low In, Ga and Sn contents. This distribution allows to make the hypothesis of a shallow origin for part of the mineralizing fluids.

By comparison with other polymetallic provinces, Peruvian province is characterized by high In content and low Ge content.

INTRODUCCION

Con el propósito de estudiar, a la escala de una provincia metalogénica, la repartición de ciertos elementos menores y trazas (Ag, Bi, Hg, Se, Cd, In, Ge, Ga, Sn, ...) en

28 NOV. 1983

O. R. S. I. O. M. Fonds Documentaire

Nº : 83/R/03956

Cote : B. ex 1

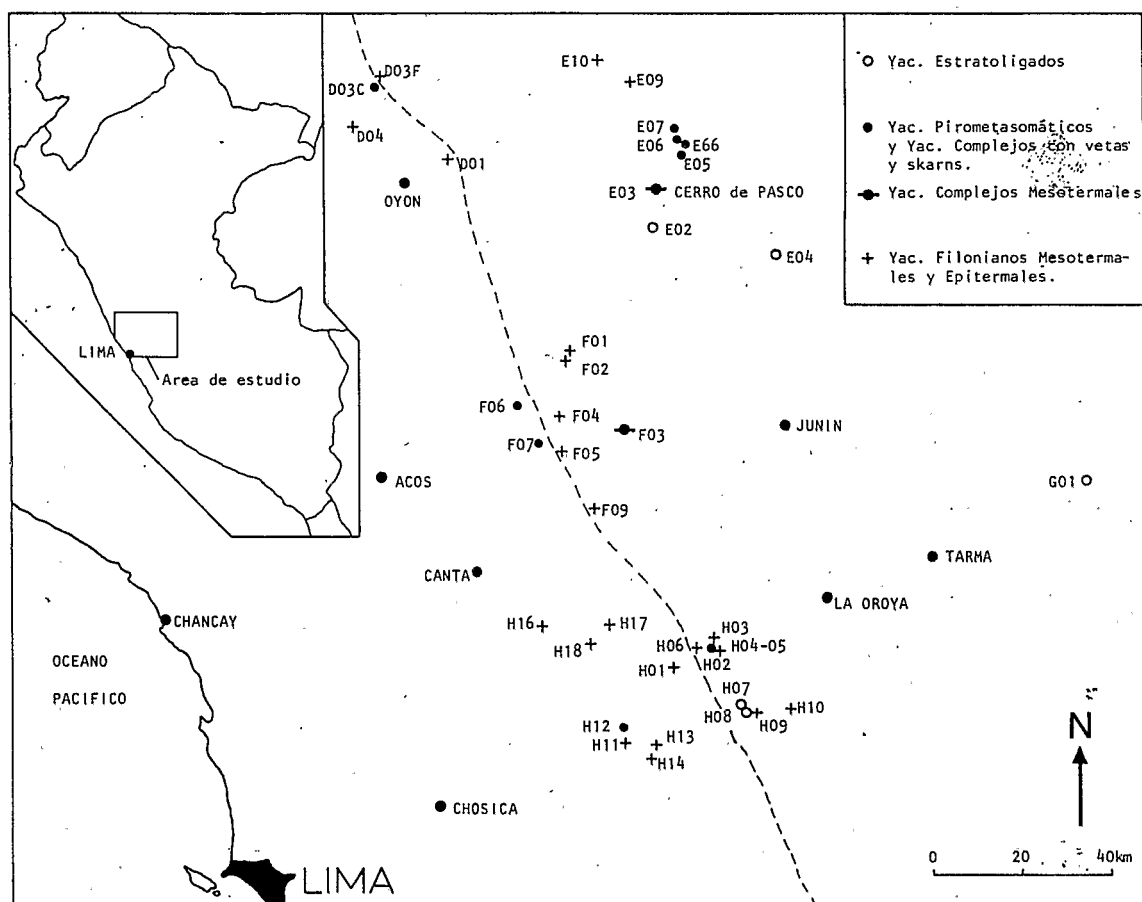


FIGURA 1 - UBICACION de los YACIMIENTOS MUESTREADOS -

LISTA de los YACIMIENTOS MUESTREADOS :

D01	UCHUCCHACUA	F07	SANTANDER
D03C	RAURA (CATUVA-HADA)	F09	MAGOCEMA
D03F	RAURA (FLOR DE LOTO)	G01	SAN VICENTE
D04	CHANCA	H01	CASAPALCA
E02	COLQUIJIRCA	H02	MOROCOCHA (Centromin)
E03	CERRO DE PASCO	H03	MOROCOCHA (Austria Duvaz)
E04	SHALIPAYCO	H04	MOROCOCHA (Centraminas)
E05	MILPO	H05	MOROCOCHA (Alpamina)
E06	ATACOCHA	H06	SANTA RITA (Morococha)
E66	SANTA BARBARA (ATACOCHA)	H07	CARAHUACRA
E07	MACHCAN	H08	HUARIPAMPA
E09	VINCHOS	H09	SAN CRISTOBAL
E10	JOGOCHUCCHO	H10	ANDAYCHAGUA
F01	HUARON	H11	SAN NONATO (Viso)
F02	ANIMON	H12	SAN MARINO
F03	CARHUACAYAN	H13	MILLOTINGO
F04	RIO PALLANGA	H14	PACOCOCHA
F05	ALPAMARCA	H16	HUAMPAR (Colqui - Finlandia)
F06	CHUÑGAR	H17	CARIDAD
		H18	VENTUROSA

las menas de Pb-Zn, más de 40 yacimientos han sido muestreados en la parte central de la provincia polimetálica peruana (departamento de Lima, Pasco y Junín - Figura 1).

El objetivo es buscar los lazos genéticos posibles entre repartición de estos elementos y características de los yacimientos (situación geográfica, tipo, edad y litología de las rocas encajonantes, época de mineralización, naturaleza y edad de los intrusivos, asociaciones minerales, ...).

Los estudios sobre la distribución de los oligo elementos son muy numerosos y pueden ser gruesamente divididos en dos familias; los estudios geoquímicos sobre la distribución cuantitativa de uno o varios elementos trazas, a escala de un yacimiento o globalmente, por un lado, dentro de los cuales se puede citar las síntesis de Fleisher (1955), Vlasov (1964), Ivanov (1966, 1968), ... y, por otro lado, los estudios de distribución de elementos menores y trazas entre sulfuros al equilibrio, con la perspectiva de usarla como geotermómetro, dentro de los cuales se puede citar, entre muchos otros, los trabajos de McIntire (1963), Ghosh-Dastidar y otros (1970), Bethke y Barton (1971), ...

El presente trabajo pertenece a la primera categoría con la particularidad de tratar de hacer una síntesis sobre un gran número de yacimientos, de tipos metalogénicos variados, en una zona geográficamente limitada, que corresponde a una parte de una "provincia metalogénica". La extensión del estudio al conjunto de la provincia se está realizando actualmente.

En esta primera etapa, se realizaron más de 850 análisis de menas, concentrados y rocas. El muestreo realizado en cada yacimiento ha sido cualitativo (promedio de 10 muestras de mena por yacimiento). La mayoría de los análisis se hicieron sobre menas y minerales gruesamente escogidos sin que se haga análisis de minerales separados ni estudios de distribución de elementos trazas entre sulfuros. Es decir que los resultados y conclusiones presentados aquí deben ser considerados como una primera aproximación que tendrá que ser precisada en muchos de sus aspectos.

I. SINTESIS SOBRE LA METALOGENIA DEL Pb-Zn EN EL PERU CENTRAL

No entra en el cuadro del presente trabajo presentar la geología de los Andes del Perú Central. Ha sido descrita y discutida en muchas publicaciones, desde los estudios "clásicos" de McLaughlin (1924) y Steinmann (1929) hasta los trabajos recientes de Mégard (1973, 1978), Dalmeyrac, Laubacher y Marocco (1977), Cobbing (1973), Cobbing y otros (1981), ...

En cuanto a la metalogenia del Pb-Zn, es necesario dar una rápida síntesis para precisar el cuadro de interpretación de los resultados geoquímicos presentados. Dicha síntesis no pretende ser completa y el lector se referirá a los trabajos generales sobre la metalogenia peruana (De las Casas y Ponzoni, 1969; Bellido y otros, 1969; Ponzoni, 1981; ...) y a trabajos más específicos sobre los casos "clásicos" de yacimientos hidrotermales andinos (Cerro de Pasco Corporation - Geological Staff, 1970; Petersen, 1965; Einaudi, 1977, entre muchos otros) y sobre los "metalotectos" sedimentarios mesozoicos (Dunin Borkovski, 1975; Köbe, 1977; Samaniego, 1981; ...).

Dentro de los yacimientos de Pb-Zn del Perú Central una primera distinción se impone entre los yacimientos hidrotermales (sensu lato) genéticamente ligados al magmatismo andino terciario y los yacimientos estratoligados singenéticos o diagenéticos en la

serie Mesozoica.

1.1 Yacimientos genéticamente ligados al magmatismo andino terciario

Estos yacimientos son los más numerosos y los más importantes desde el punto de vista económico. Dentro de aquéllos, se encuentran los casos "clásicos" de la metalogénia andina (Cerro de Pasco, Morococha, Casapalca) y muchos otros yacimientos de similar importancia que han sido objeto de pocas publicaciones (Raura, Milpo, Atacocha, Huarón, ...).

Son yacimientos típicamente hidrotermales, de morfología y tamaño muy variables, con asociaciones minerales muy a menudo complejas, zoneamientos y frecuente "telescoping" de paragénesis. Genéticamente están ligados al magmatismo andino terciario. Cuando afloran, las intrusiones son pequeños stocks (algunos km² o menos de afloramiento) de diorita, granodiorita, muy a menudo cuarzo-monzonita, a menudo pórfido dacítico o andesítico, que recortan las series sedimentarias plegadas del Mesozoico y Eoceno y las series volcánicas y volcano-sedimentarias del Oligo-Mioceno. Estas intrusiones, muy a menudo de carácter hipabisal, son, en su gran mayoría, posteriores a las fases principales de deformación (Mégard, 1973, 1978; Dalmeyrac, Laubacher y Marocco, 1977; ...). Las dataciones radiométricas de aquéllas, dan edades del Mioceno medio a superior (Eyzaguirre y otros, 1975; Silbermann y Noble, 1977; ...).

Dentro de estos yacimientos, que se encuentran en una franja de 70 km de ancho, paralela a la fosa, tanto en la Cordillera Occidental como en las Altas Mesetas (figura 1), se puede distinguir:

- los yacimientos filonianos mesotermales a epitermales en el Paleozoico Inferior (Jogochucho, San Cristóbal, Andaychagua), en las calizas Triásico-Liásicas del grupo Pucará (Vinchos, Machcán), en las calizas Turonianas de la formación Jumasha (Uchucchacua, Flor de Loto - Raura), en las Capas Rojas del Cretáceo terminal - Eoceno y en las series volcánicas y volcano-sedimentarias del Oligo-Mioceno (Chanca, Colquí, San Nonato, Millotíngio, Paçococha, Casapalca, Algamarca, Río Pallanga, Huarón, Animón, ... para citar los más importantes).

- los yacimientos pirometasomáticos (ganga de skarn) en las calizas del grupo Pucará (Santa Bárbara - Atacocha) o en las calizas turonianas de la formación Jumasha (Santander, Chungar). Estos yacimientos, estrictamente con ganga de skarn, son poco numerosos y de tamaño muy variable. Su potencial puede llegar a varios millones de toneladas (Santander), pero existen un gran número de indicios y ocurrencias poco importantes.

- los yacimientos complejos donde se encuentran a la vez cuerpos y filones. Estos cuerpos son cuerpos de skarn mineralizado en el Pucará (Milpo, Atacocha, Morococha) o el Jumasha (Raura) o cuerpos de reemplazamiento a temperatura más baja (Cerro de Pasco, Carhuacayán). Las vetas pueden cortar los cuerpos (Cerro de Pasco) o alejarse de los cuerpos hacia la periferie del yacimiento en el mismo encajonante calcáreo (Carhuacayán, Atacocha, Morococha, Raura) o en un encajonante diferente no favorable para la formación de cuerpos (areniscas del Goyllarisquizga en Milpo, andesitas pérmicas en Morococha).

En todos estos yacimientos un stock intrusivo está presente en el afloramiento. La morfología de estos yacimientos es por lo general muy compleja en sus detalles. Son yacimientos de gran potencial (superior a 10 millones de toneladas de mineral de mena).

- el yacimiento de Colquijirca es un caso aparte. Se trata de un yacimiento volcánico-sedimentario en una formación probablemente lacustre perteneciendo a la parte superior de las Capas Rojas del Eoceno (Lehne y Amstutz, 1978; Lehne, 1979). Es el único caso de singenetismo asociado al volcanismo andino terciario que hemos encontrado en la zona.

Las asociaciones minerales encontradas en estos yacimientos "hidrotermales" son muy complejas: en el conjunto de los yacimientos aparecen, en proporciones muy variables, esfalerita, a menudo rica en Fe; galena, siempre argentífera, y pirita, a veces argentífera (Cerro de Pasco, ...), a veces aurífera (Millotingo, Pacococha, Milpo ...). El plomo está presente también en sulfosales (bournonita, boulangerita, jamesonita). La plata, además de su presencia en galena, pirita y cobre gris, aparece como plata roja (Colquí, Millotingo, Uchucchacua, ...), argentita (Colquí, Huarón, ...), polibasita y plata negra (pearcita, stefanita, argirodita), plata nativa (Colquijirca, Vinchos, ...) y electrum.

Los minerales de Cu son principalmente chalcopirita (a menudo en exsoluciones en la esfalerita), enargita en ciertas vetas (Huarón, Cerro de Pasco, ...), cobre gris (Tenantita-tetraedrita), a menudo argentífero (freibergita) en muchas vetas (Casapalca, Morococha, Colquí, Huarón, ...), luzonita (Cerro de Pasco), ...

La arsenopirita y la pirrotita están a menudo presentes pero en proporciones menores, salvo en el caso de los "pipes" de pirrotita de Cerro de Pasco (Einaudi, 1977).

Dentro de los minerales accesorios, los minerales de Bi (bismuto nativo, bismutinita), de Sn (casiterita, estannita), de W (wolframita), de Mo (molibdenita) se encuentran frecuentemente en las zonas profundas de los cuerpos y vetas (Cerro de Pasco, Milpo, San Cristóbal, ...). Al contrario en las partes altas de las vetas, se encuentran estibina (Huarón, Río Pallanga, ...), rejalgamita y oropimente (Atacocha, ...) y cinabrio. La presencia de telururos y seleniuros ha sido señalada en varios yacimientos.

El fenómeno de "telescoping" de paragénesis es general; traduce la débil profundidad de formación de estos yacimientos en los cuales los intrusivos son generalmente hipovolcánicos. A pesar del "telescoping", un zoneamiento hidrotermal nítido se observa en casi todos los yacimientos; la regla general es la predominancia de Fe, Cu y Zn en la zona interna y el aumento de las leyes de Pb y luego de Ag en la zona externa. Esta regla no es absoluta y, en cada caso, un estudio detallado del zoneamiento es necesario, por ejemplo por el método de los "cocientes metálicos" (Wu y Petersen, 1977; Petersen, 1982; ...).

1.2 Yacimientos estratoligados en la serie Mesozoica

Dos "metalotectos" sedimentarios importantes han sido descritos en el Perú Central: el grupo Pucará, Triásico-liásico, y la formación Santa del Valanginiense.

No presentamos todavía resultados sobre yacimientos estratoligados de la formación Santa, extensamente descritos por Samaniego (1981); en su mayoría, se encuentran al Norte de la zona actualmente estudiada, sobre todo en el departamento de Ancash.

Los tres yacimientos estratoligados por los cuales presentamos resultados, se encuentran en la parte inferior del grupo Pucará: Carahuacra - Huaripampa en el flanco W del domo de Yauli, Shalipayco y San Vicente en los flancos W y E, respectivamente, de la Cordillera Oriental (figura 1). Varios otros pequeños yacimientos e indicios del

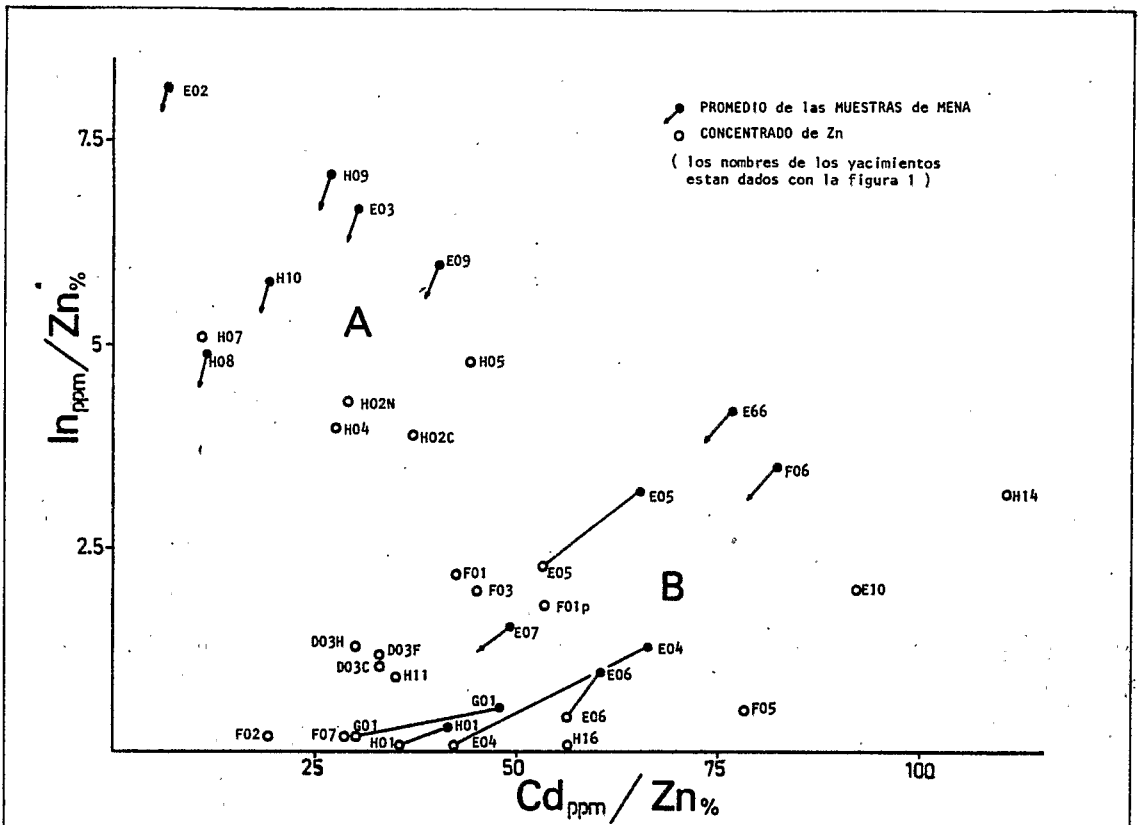


FIGURA 2 - DISTRIBUCION del CADMIO y del INDIO en los YACIMIENTOS de Pb-Zn del PERU CENTRAL .

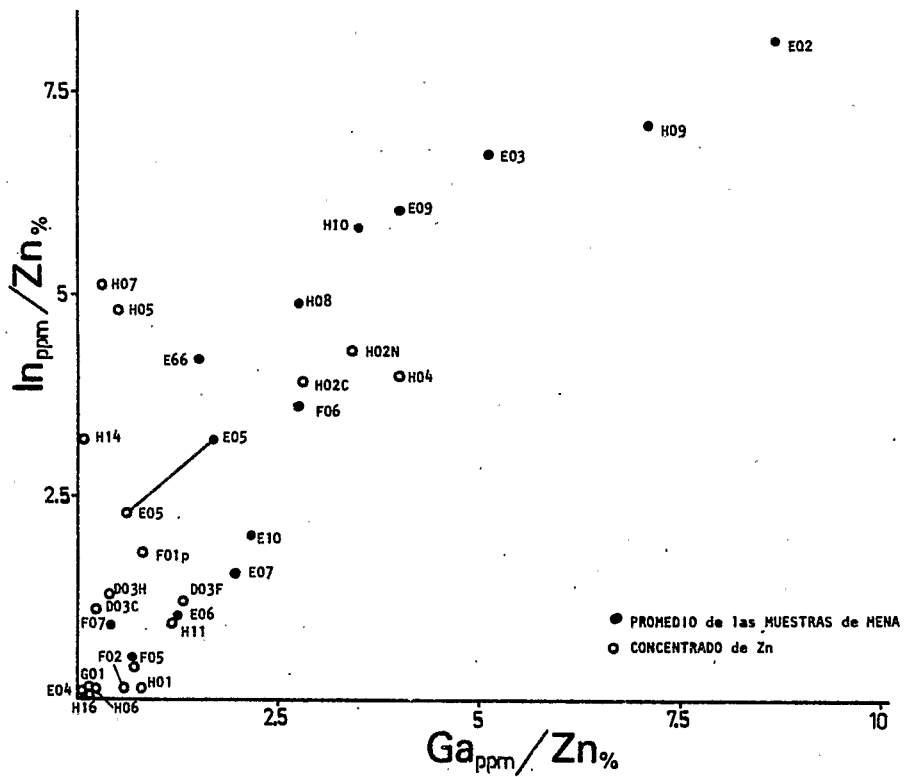


FIGURA 3 - DISTRIBUCION del INDIO y del GALIO en los YACIMIENTOS de Pb-Zn del PERU CENTRAL .

mismo tipo son conocidos en la zona (Dunin Borkowski, 1975; Levin y Samaniego, 1975; Kóbe, 1977; ...).

Globalmente (Mégard, 1978), el grupo Pucará está constituido por hasta más de tres mil metros de calizas bituminosas de plataforma con cherts e intercalaciones terrígenas; facies epicontinentales se presentan en su base; manifestaciones volcánicas (más que todo tufos y algunos derrames) contemporáneas a la sedimentación carbonatada son frecuentes.

En Shalipayco y San Vicente los lentes de mineral se encuentran en niveles dolomíticos de extensión regional, formados durante la diagénesis precoz. El nivel "portador" de San Vicente es conocido a lo largo de más de 150 km en el sentido N-S con anomalías de Zn y Pb. San Vicente, con un potencial superior a 10 millones de mineral de mena, se asemeja al tipo "Mississippi Valley". Los fenómenos diagenéticos (dolomitización, brechamiento, formación de ritmitas, ...; Levin y Amstutz, 1976) son muy importantes para la reconcentración de los metales de interés económico. No se observa manifestaciones volcánicas estrictamente contemporáneas de la mineralización. La paragénesis, en estos dos yacimientos, es muy simple: esfalerita principalmente, con galena, poca pirita y muy poca chalcopirita. Lateralmente la baritina aparece al Sur de Shalipayco.

En Carahuacra - Huaripampa, los lentes de mineral, en calizas, son intercalados con niveles de tufos. Alrededor de estos lentes se encuentra una primera aureola de caliza silicificada, luego una aureola de caliza dolomitizada. Esfalerita, poca galena y abundantes minerales de hierro (pirita, hematita, siderita) constituyen la paragénesis. Se observan removilizaciones tardías en vetas, generalmente más ricas en Pb y Ag que los lentes estratoligados. El yacimiento es muy probablemente de origen volcánico-sedimentario (exalativo, submarino) (Vera, 1978).

II. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS MENORES Y EN TRAZAS

Presentamos los resultados en forma global, usando para cada yacimiento el promedio de los análisis de muestras de mena y los análisis de los concentrados de Pb y de Zn, cuando los tenemos. No se hizo todavía análisis de los minerales mismos. La distribución de los oligo-elementos entre los diferentes minerales de mena y de ganga ha sido inferida por comparación entre análisis de menas y análisis de concentrados y por referencia de los datos de la bibliografía. Es decir que los resultados e interpretaciones presentados aquí constituyen un primer esbozo. La interpretación detallada de las variaciones de leyes de los elementos menores y trazas dentro de cada uno de los yacimientos muestreados y el estudio correlativo de las asociaciones minerales se están llevando a cabo y serán objeto de publicaciones ulteriores.

II.1 Oligo-elementos principalmente ligados al Zn: Cd, In, Ge, Ga.

Consideramos cuatro oligo-elementos que tienen un coeficiente de partición, entre sulfuros, tan favorable para la esfalerita que se considera generalmente, en primera aproximación, que se encuentran exclusivamente en este mineral. El Cadmio y el Indio tienen leyes por encima del límite de detección incluso cuando la ley de Zinc es baja, lo que ha permitido averiguar la validez de la hipótesis de concentración exclusiva en la esfalerita, por comparación entre los análisis de menas y los análisis de concentra

dos. En cuanto al Cadmio, dicha hipótesis es generalmente válida, con dos excepciones: se notan concentraciones de Cd en los granates cálcicos de la ganga de los yacimientos pirometasomáticos y de los yacimientos complejos con skarns y vetas asociadas, y en los carbonatos de ganga del yacimiento estratoligado de San Vicente. En ambos casos, usaremos únicamente las leyes en los concentrados de Zn, para las comparaciones a nivel regional. En cuanto al Indio, las dos excepciones citadas se presentan también, aunque en menor grado, pero se debe agregar una tercera, referente a los yacimientos con abundantes sulfosales de Ag, Cu, Pb. La comparación entre leyes en las menas y en los diferentes concentrados demuestra concentraciones de In en estas sulfosales, particularmente en los cobre gris (tetraedrita-tennantita) y en la enargita. La enargita es un conocido portador de In (Anderson, 1953). Sin análisis de minerales separados, sería prematuro dar hipótesis sobre la distribución del In entre la esfalerita y los sulfosales. Para las comparaciones a nivel regional, usaremos las leyes de In en los concentrados de Zn. En cuanto al Germanio y al Galio, las leyes a menudo muy bajas en las menas no han permitido averiguar la hipótesis de la concentración exclusiva en las esfaleritas.

a) Cadmio e Indio

Hemos anotado en un diagrama Cd/Zn - In/Zn el conjunto de los yacimientos, considerando para cada uno de ellos el análisis del concentrado de Zn o el promedio de los análisis de menas, cuando no tenemos análisis de concentrado. En este segundo caso, es de considerar que las razones Cd/Zn e In/Zn de la figura 2 son mayores a las razones reales en la esfalerita, como se ha mostrado antes. A base de la figura 2, constatamos lo siguiente :

- las leyes de Cd varían mucho de un yacimiento a otro; la razón Cd (ppm)/Zn (%) varía de 7 en Colquijirca, 12.3 en Carahuacra hasta 110 en Pacococha, o sea el contenido de Cadmio en la esfalerita varía aproximadamente de 500 g/t en Colquijirca, 825 g/t en Carahuacra hasta 6700 g/t en Pacococha.

- las leyes de Cd más bajas se encuentran en los yacimientos volcano-sedimentarios (Colquijirca, Carahuacra, Huaripampa).

- en cuanto a los demás yacimientos, la razón Cd (ppm)/Zn (%) varía de 19 en Animón a 110 en Pacococha, o sea aproximadamente de 1250 g/t a 6700 g/t de Cd en la esfalerita. La distribución de la ley de Cd, a escala regional, no está controlada ni por el tipo de yacimiento ni por la temperatura de formación, con la excepción de las leyes bajas en los yacimientos volcano-sedimentarios. Fleisher (1955) menciona que el contenido de Cd de las esfaleritas parece independiente de las condiciones de formación mientras Ivanov (1964) concluye que las leyes fuertes de Cd se encuentran en los yacimientos de tipo skarns o en las vetas epitermales ricas en Ag. Las conclusiones sobre Cd en la provincia polimetálica peruana concuerdan con las conclusiones de Fleisher.

- las leyes de In varían también considerablemente de un yacimiento a otro siendo el mínimo inferior a 10 g/t In en esfalerita (Casapalca, Shalipayco, San Vicente) y el máximo 550 g/t In en la esfalerita en Colquijirca.

- los yacimientos volcano-sedimentarios tienen leyes altas de In (entre 350 y 550 g/t In en la esfalerita) mientras que los yacimientos estratoligados sin volcanismo asociado tienen leyes muy bajas de In (< 10 g/t en la esfalerita de San Vicente y Sha-

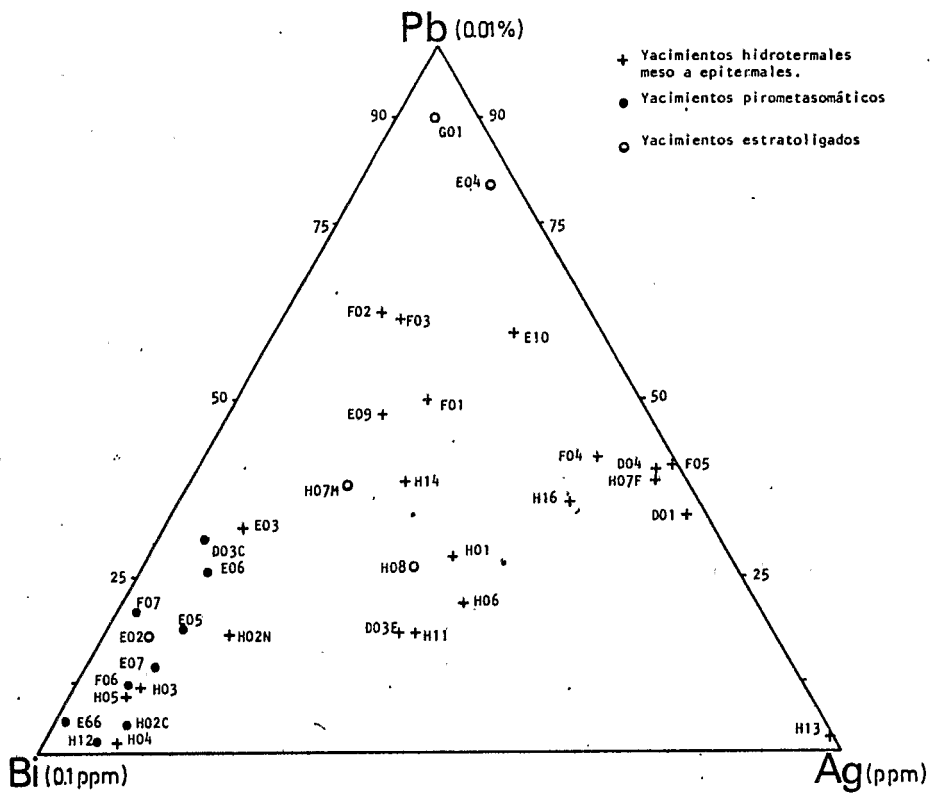


FIGURA 4 - DISTRIBUCION del PLOMO, del BISMUTO y de la PLATA en los YACIMIENTOS de Pb-Zn del PERU CENTRAL.

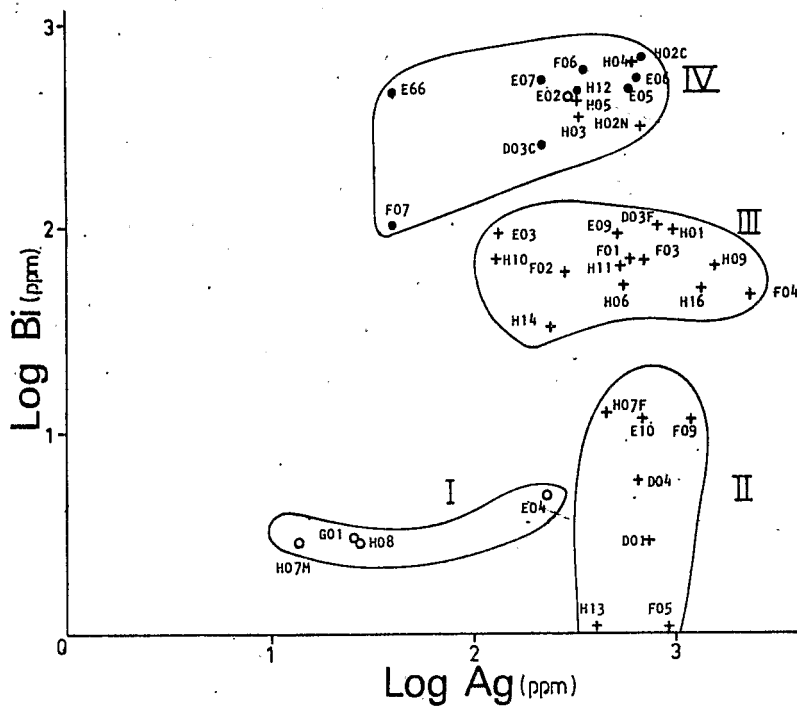


FIGURA 5 - DISTRIBUCION de la PLATA y del BISMUTO en los YACIMIENTOS de Pb-Zn del PERU CENTRAL.

lipayco).

- en cuanto a los yacimientos hidrotermales genéticamente ligados al magmatismo andino, la ley de In, a escala regional, no está controlada ni por el tipo de yacimiento ni por la temperatura de formación. Fleisher (1955) nota que, en la mayoría de las publicaciones, se considera altas leyes de In como características de yacimientos mesotermiales o de alta temperatura. El mismo nota que "numerous exceptions of these generalizations have been noted". La provincia polimetálica peruana constituye una de estas excepciones.

- considerando conjuntamente leyes de Cd y de In (figura 2), se nota la existencia de dos grupos dentro de los yacimientos de la parte central de la provincia peruana: un grupo A con una razón Cd/In < 9 , con leyes de In en la esfalerita superior a 250 g/t y leyes de Cd que no pasan 0.29% en la esfalerita. Un grupo B con una razón Cd/In > 18 , con leyes de Cd en promedio más altas y leyes de In a menudo bajas a muy bajas. Los yacimientos estratoligados volcanogénicos y sin volcanismo asociado se encuentran en los grupos A y B respectivamente. La distribución de los yacimientos hidrotermales entre estos dos grupos no responde a ningún criterio de tipo o de temperatura de formación. En el grupo A se encuentran los yacimientos encajonados por parte en el Paleozoico Inferior (formación Excelsior: Cerro de Pasco, Andaychagua, San Cristóbal) y los yacimientos que geográficamente y geológicamente se encuentran cerca del Paleozoico Inferior (Vinchos, Morococha). Es de notar que los yacimientos volcano sedimentarios también se encuentran influenciados por el Paleozoico: Colquijirca cerca del "domo" de Cerro de Pasco y Carahuacra - Huaripampa en el fianco W del "domo" de Yauli (figura 1). Tenemos aquí la evidencia de un control litológico sobre la abundancia de In (y Cd): los yacimientos encajonados en el Paleozoico Inferior (areniscas, silts y lutitas de la formación Excelsior) o directamente influenciados por su cercana presencia, tienen leyes altas de In y leyes de Cd a menudo bajas. Desarrollaremos en las conclusiones las consecuencias de dicho control que, como lo vamos a ver, abarca otros elementos.

b) Germanio

Los yacimientos genéticamente ligados al magmatismo andino tienen leyes de Ge muy bajas. Todos los concentrados de Zn de estos yacimientos tienen menos de 10 g/t Ge. En algunos casos (Uchucchacua, Río Pallanga), los análisis dan, esporádicamente, leyes un poco elevadas (hasta 30 g/t) pero sin que esto se refleje sobre el análisis promedio de menas o en el concentrado. Los yacimientos volcano sedimentarios presentan también leyes de Ge muy bajas, del mismo orden que aquéllas de los yacimientos "hidrotermales". Los únicos yacimientos de la zona que presentan leyes notables de Ge son los yacimientos estratoligados no volcanogénicos de la base del grupo Pucará: 90 g/t y 30 g/t Ge en los concentrados de Zn de Shalipayco y San Vicente respectivamente. Fleisher (1955), citando varios autores, nota que las esfaleritas de yacimientos de baja temperatura, como los del tipo "Mississippi Valley", contienen más Germanio que aquéllas de los yacimientos mesotermiales o de alta temperatura. Los yacimientos de la provincia polimetálica peruana obedecen a esta regla; pero, la ausencia del Ge en los yacimientos volcano-sedimentarios y en la casi totalidad de los yacimientos hidrotermales, incluso aquellos epitermales ricos en Ag, nos hace notar que el control de la

abundancia del Germanio no es simplemente un control por la temperatura de formación de los yacimientos sino principalmente por el mecanismo mismo de formación de las menas y por el origen de los metales que las constituyen. Desarrollar esta observación nos llevaría a una discusión sobre la génesis de los yacimientos del tipo "Mississippi Valley" que no entra en el cuadro del presente trabajo.

c) Galio

Hemos apuntado en un diagrama In/Zn - Ga/Zn el conjunto de los yacimientos considerando para cada uno de ellos el análisis de concentrado de Zn o el promedio de los análisis de menas, cuando no tenemos análisis de concentrado. A base de la figura 3 constatamos lo siguiente :

- Los yacimientos estratoligados sin volcanismo asociado (Shalipayco - San Vicente) tienen leyes de Ga muy bajas (< 10 g/t en los concentrados de Zn).

- Los yacimientos "hidrotermales" asociados al magmatismo andino, muestran leyes de Ga muy variables, desde leyes muy bajas (< 10 g/t en las esfaleritas de Casapalca, Huampar, Paçococha) hasta leyes de 200 a 350 g/t de Ga en las esfaleritas de Morococha, San Cristóbal, Cerro de Pasco. Los yacimientos pirometasomáticos presentan una cierta homogeneidad en cuanto a su ley de Ga: 20 - 100 g/t. La distribución del Ga dentro de los otros yacimientos asociados al magmatismo andino no corresponde a ningún criterio de tipo o de temperatura de formación. Se considera generalmente (Fleischer, 1955) que el Galio es más abundante en los yacimientos de baja temperatura. Esta regla no es cierta para los yacimientos de la provincia peruana.

- Los yacimientos volcano-sedimentarios no son homogéneos en cuanto a su ley de Ga: Carahuacra - Huaripampa tienen leyes bajas, mientras Colquijirca tiene una ley muy alta.

- Considerando conjuntamente leyes de In y de Ga (figura 3) se observa para las leyes altas de Ga, una nítida correlación In-Ga a escala regional. Los yacimientos ricos en Ga son aquellos encajonados en el Paleozoico o directamente influenciados por su cercanía (Morococha, Cerro de Pasco, Vincos, San Cristóbal, Andaychagua, Jogochucho muestran leyes de Ga encima de 130 g/t. Sin embargo, la diferencia entre estos yacimientos hidrotermales no es tan nítida en el diagrama In-Ga como lo está en el diagrama Cd-In.

11.2 Plata y Bismuto

Considerando el análisis promedio de menas para cada yacimiento, podemos distinguir varias familias dentro de los yacimientos de la parte central de la provincia polimetálica peruana, en cuanto a leyes de Ag y Bi (figuras 4 y 5).

- los yacimientos estratoligados de la base del Pucará (1) se caracterizan por la asociación de leyes de Bi muy bajas (inferiores a 5 g/t) y de leyes de Ag bajas (230 g/t en Shalipayco, 27 g/t en San Vicente, 26 g/t en Huaripampa, 14 g/t en Carahuacra). Los yacimientos sin volcanismo asociado (San Vicente, Shalipayco) presentan leyes notables de Pb (razón Zn/Pb de 3 a 5) y una razón Ag/Pb muy baja, mientras que los yacimientos volcanogénicos (Carahuacra - Huaripampa) presentan leyes de Pb muy bajas (Zn/Pb superior a 50).

Los yacimientos genéticamente ligados al magmatismo andino se distinguen de los yacimientos estratoligados, por sus leyes nítidamente más elevadas de Bi y/o Ag. Aquellos yacimientos se dividen en tres grupos:

- yacimientos con ley de Bi muy baja (inferior a 13 g/t) y ley de Ag alta (500 a 1150 g/t) (II). Son yacimientos filonianos mesotermiales a epitermiales en los cuales la plata se encuentra en la galena y bajo la forma de sulfosales. La razón Ag/Pb es muy variable de un yacimiento a otro (figura 4).

- yacimientos con ley mediana de Bi (30 a 100 g/t) y ley de Ag mediana a muy alta (mínimo 140 g/t en Cerro de Pasco, máximo 2370 g/t en Río Pallanga). Son yacimientos mesotermiales filonianos y dos yacimientos complejos mesotermiales (Cerro de Pasco, Carhuacayán) (III). Este grupo presenta una gran heterogeneidad en cuanto a las leyes de Pb y Ag.

- yacimientos con alta ley de Bi (superior a 150 g/t). Son los yacimientos pirometasomáticos y los yacimientos complejos con skarns y vetas asociadas (IV). Ciertos yacimientos estrictamente pirometasomáticos presentan leyes de Ag bajas (41 g/t en Santander, 39 g/t en Santa Bárbara). Los demás yacimientos de este grupo presentan leyes de Ag de 200 a 700 g/t. Es de notar que el yacimiento volcanogénico estratoligado Eoceno de Colquijirca pertenece a este grupo IV y se distingue nítidamente de los yacimientos volcanogénicos de la base del Pucará.

En los yacimientos "hidrotermales" terciarios, la ley de Bi está principalmente controlada por la temperatura de formación del yacimiento, las leyes altas de Bi siendo características de los yacimientos de alta temperatura. Al contrario, las leyes más elevadas de Ag se encuentran en yacimientos filonianos mesotermiales a epitermiales pero las leyes de Ag son muy variables dentro de yacimientos de un mismo tipo.

No aparece ninguna correlación entre las leyes de Bi y Ag y la naturaleza y edad de las rocas encajonantes.

11.3 Mercurio

En los yacimientos asociados al magmatismo andino, aparece globalmente una correlación entre "altas" leyes de Ag y "altas" leyes de Hg. Dicha correlación está particularmente nítida para los yacimientos del grupo III definido antes (figura 4).

Los yacimientos hidrotermales con las leyes de Hg más altas son vetas mesotermiales a epitermiales en diferentes encajonantes (Paleozoico Inferior: San Cristóbal, 30 g/t; calizas Jumasha: Raura - Flor de Loto, 14 g/t; Capas Rojas: Magocema, 17 g/t; volcánicas terciarias: Río Pallanga (19 g/t), Colqui (111 g/t). No aparece ningún control litológico sobre la abundancia del Mercurio. A la escala del yacimiento se nota un enriquecimiento en Hg hacia la zona externa, formada a más baja temperatura.

El control de la abundancia de Hg parece ser principalmente físico (temperatura de formación); dicho control no es tan drástico como para el Bismuto; se nota, en particular, las leyes muy bajas de Hg en yacimientos mesotermiales a epitermiales como Chanca, Uchucchacua, Andaychagua, Cerro de Pasco y Casapalca.

Dentro de los yacimientos estratoligados, volcanogénicos o no, se nota una nítida correlación Ag-Hg. Shalipayco (230 g/t Ag; 67 g/t Hg) y Colquijirca (309 g/t Ag; 32 g/t Hg), a pesar de leyes no muy altas en Ag, están dentro de los yacimientos de la zona más ricos en Hg.

11.4 Selenio

En los yacimientos estratoligados, volcanogénicos o no, las leyes de Selenio son bajas a muy bajas: 15 g/t en San Vicente, 10 g/t en Shalipayco, inferior a 10 g/t en Colquijirca y en Carahuacra - Huaripampa.

Dentro de los yacimientos asociados al magmatismo andino, se puede distinguir :

- los yacimientos de skarn y los yacimientos complejos de alta temperatura, con leyes notables de Se (máximo 59 g/t en Santa Bárbara, mínimo 16 g/t en Raura - Catura). Este grupo se caracteriza por su relativa homogeneidad geoquímica.

- los yacimientos filonianos en los cuales la ley de Se está muy variable (inferior a 10 g/t en Morococha, San Cristóbal, Cerro de Pasco, Vinchos, Jogochuccho, Milingo, San Nonato, ...; 21 g/t en Huampar, 24 g/t en Uchucchacua, 52 g/t en Río Pallanga, 49 g/t en Raura - Flor de Loto, 71 g/t en Pacococha, 81 g/t en Huarón, 114 g/t en Chanca y 518 g/t en Alpamarca, ...). Es de notar un enriquecimiento en Se en los yacimientos epitermales de Ag y la ausencia del Se en los yacimientos encajonados en el Paleozoico o influenciados por su cercanía.

11.5 Estaño

Los yacimientos de Pb-Zn-(Ag) del Perú Central se caracterizan por la presencia sistemática del Estaño. En las menas, las leyes más elevadas de Sn se encuentran en yacimientos encajonados en el Paleozoico o influenciados por su cercanía (1120 g/t en Jogochuccho, 1030 g/t en San Cristóbal, 800 g/t en la parte central de Morococha, 240 g/t en Cerro de Pasco). Este control litológico, demostrado ya por In, Ga y Se, no es único pues leyes notables de Sn (140 g/t en Milpo, 130 g/t en Huarón, 120 g/t en Pacococha, 100 g/t en Chanca) se encuentran en yacimientos de varios tipos metalogénicos, encajonados en las formaciones Mesozoicas y Terciarias.

Los yacimientos estratoligados volcanogénicos muestran leyes notables de Sn: 226 g/t en Huaripampa, 170 g/t en Carahuacra, 60 g/t en Colquijirca, mientras que la ley de Sn es más variable en los yacimientos estratoligados sin volcanismo asociado de la base del Pucará: 110 g/t en Shalipayco y 17 g/t en San Vicente.

III. CONCLUSIONES

El inventario de las distribuciones de los elementos Cd, In, Ge, Ga, Ag, Bi, Hg, Se, Sn en los yacimientos de Pb-Zn de la parte central de la "Provincia Polimetálica Peruana" ha permitido mostrar que, generalmente, la abundancia de estos elementos puede ser interpretada, a escala regional, a base de tres factores: tipo metalogénico del yacimiento, temperatura de deposición de las menas, edad y naturaleza de las rocas encajonantes.

En lo que concierne al factor "tipo metalogénico", las principales conclusiones son :

- en los yacimientos estratoligados sin volcanismo asociado de la base del Mesozoico (grupo Pucará), abundancia de Ge, leyes muy bajas de Ga, In, Se, Bi y una razón Ag/Pb muy baja.

- en los yacimientos volcanogénicos de la base del Mesozoico, leyes altas de In y

Sn y leyes muy bajas de Pb, Cd, Ge, Ag, Bi y Se.

- en el yacimiento volcanogénico estratoligado Eoceno de Colquijirca, leyes altas de In, Sn, Bi, Ag, Ga y leyes muy bajas de Cd, Ge, y Se.

- en los yacimientos hidrotermales ligados al magmatismo andino terciario, los únicos rasgos comunes son la ausencia de Ge y la abundancia de Ag.

En este último grupo, el factor "temperatura de deposición de las menas" permite distinguir :

- los yacimientos formados a alta temperatura (yacimientos pirometasomáticos sensu stricto y yacimientos complejos con skarns y vetas asociadas) con altas leyes de Bi, leyes notables de Se, leyes medianas de Ag y Cd, leyes muy bajas de Hg; este grupo se distingue por su homogeneidad geoquímica; aquella homogeneidad traduce, por un lado, las condiciones físicas de formación vecinas en todos los yacimientos del grupo y, por otro lado, la similitud química de las rocas intrusivas calco-alcalinas, generalmente pórfidos cuarzo-monzoníticos, responsables de estas mineralizaciones.

- los yacimientos filonianos mesotermales a epitermales forman un grupo muy poco homogéneo; el único rasgo común es la abundancia de Ag. Las leyes de Bi bajan y las leyes de Hg suben, respectivamente, a temperatura decreciente de formación.

Esporádicamente se observan leyes notables de Ge en ciertos yacimientos epitermales ricos en Ag. Este grupo destaca por su complejidad de las asociaciones minerales; falta poner en evidencia los factores locales que puedan explicar la heterogeneidad de este grupo.

El factor "edad y naturaleza de las rocas encajonantes" nos hizo distinguir :

- los yacimientos encajonados en el Paleozoico Inferior (areniscas, silts y lutitas de la formación Excelsior) caracterizados por leyes altas de In, Ga, Sn, leyes de Cd en promedio bajas y leyes de Se muy bajas.

- los yacimientos encajonados en el Mesozoico y Cenozoico, caracterizados por leyes bajas de In y Ga, leyes de Sn a menudo bajas, leyes de Cd en promedio altas y leyes de Se a menudo notables o altas.

Esta distinción geoquímica entre yacimientos de la misma edad, de tipos metalogénicos similares, ligados a intrusiones calco-alcalinas sub-contemporáneas, permite afirmar que parte de los fluidos responsables de la formación de estos yacimientos tienen su origen en el encajonante mismo del yacimiento (en un sentido amplio). Tres niveles portadores potenciales de Cd y Se son conocidos en el Mesozoico; el origen de Sn, In y Ga "extraídos" del Paleozoico Inferior no está todavía esclarecido.

Es de notar que el factor geográfico no interviene para explicar las distribuciones de los elementos menores y trazas, por lo menos a la escala de la parte central de la provincia. En particular, no aparecen diferencias geoquímicas que se pueda atribuir a una distancia más o menos grande al plano de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Americana.

Teniendo en cuenta que no se ha realizado el estudio detallado de cada uno de los yacimientos muestreados, particularmente en lo que concierne a las condiciones físico-químicas de formación, y que los análisis se hicieron sobre menas sin análisis de minerales separados, hay que considerar las presentes conclusiones como un primer esbozo y un cuadro para estudios posteriores más detallados.

AGRADECIMIENTOS

El programa de investigación sobre metales trazas en los yacimientos de Pb-Zn del Perú Central se está llevando a cabo en el cuadro del Convenio de Acción Conjunta 1980-1983 entre el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú y el Office de Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM) de Francia. Agradezco al Ing. Francisco Sotillo P., Director Ejecutivo del INGEMMET, por haber autorizado la publicación del presente trabajo y al Ing. Fernando Zuloaga M., geólogo del INGEMMET, por su colaboración y sus comentarios sobre el manuscrito.

El conjunto de los análisis se realizaron en el cuadro de un Convenio entre ORSTOM y la Société Minière y Metallurgique de Peñarroya. Agradezco al personal del laboratorio de Peñarroya en Noyelles Godault (Francia) y a los geólogos de dicha compañía, los Dres. Francois Fogliezini, Jefe de la División Menas-Exploración, en París, Francis Espourteille y Gilles Monteil, en el Perú, por su decidido apoyo.

Los trabajos de campo se realizaron gracias al apoyo de las compañías mineras Milpo S. A. y Huarón S. A.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ANDERSON, J.S., 1953. Observations on the geochemistry of Indium. Geoch. Cosmoch. Acta, vol. 4: 225-240.
- BELLIDO, B.E., DE MONTREUIL, D.L. y GIRARD, P.D., 1969. Aspectos generales de la metalogenia del Perú. XI Conv. Ing. Min.: 96 p., Lima.
- BETHKE, P.M. and BARTON Jr. P.B., 1971. Distribution of some minor elements between coexisting sulphide minerals. Econ. Geol., vol. 66: 140-163.
- BOULADON, J., 1969. Contribution a une systématique des gisements de Plomb et de Zinc. Chron. Min. Rech. Min., N° 385: 215-227.
- CERRO DE PASCO CORPORATION - GEOLOGICAL STAFF, 1970. Geología de los yacimientos operados por la C. de P. Corporation. I Congreso Latino-Americano de Geología, Lima, 260 p.
- COBBING, E.J., 1973. Geología de los cuadrángulos de Canta, Barranca, Ambar y Oyón. Serv. Geol. y Min., Lima, Bol. 26, 172 p. + 4 mapas.
- COBBING, E.J. and others, 1981. The Geology of the Western Cordillera of northern Peru. Overseas Memoir 5, London, 143 p.
- DALMEYRAC, B., LAUBACHER, G. et MAROCCO, R., 1977. Caracteres Généraux de l'évolution géologique des Andes Péruviennes. These d'Etat, Univ. de Montpellier, Tome IV, 501 p.
- DE LAS CASAS, F. y PONZONI, E., 1969. Mapa metalogénico del Perú, escala 1/1'000,000. Soc. Nac. Min. Petrol., Lima.
- DUNIN BORKOWSKI, E., 1975. Control litológico y estratigráfico en la ubicación de los mantos con sulfuros de metales no ferrosos en las capas calcáreas del Perú Central. Bol. Soc. Geol. Perú, vol. 50: 25-52.
- EINAUDI, M.T., 1977. Environment of ore deposition at Cerro de Pasco, Peru. Econ. Geol., vol. 72: 893-924.
- EYZAGUIRRE, V.R. and others, 1975. Age of igneous activity and mineralization, Morocha district, Central Peru. Econ. Geol., vol. 70: 1123-1126.

- FLEISHER, M., 1955. Minor elements in some sulphide minerals. Econ. Geol., Special Issue 50 Anniv., Part II: 970-1024 (con muy importante bibliografía).
- GHOSH DASTIDAR, P., PAJARI, G.E. and TREMBATH, L.T., 1970. Factors affecting the trace element partition coefficients between coexisting sulphides. Econ. Geol., vol. 65: 815-837.
- IVANOV, V.V., 1966. The Geochemistry of the dispersed elements Ga, Ge, Cd, In and Tl in Hydrothermal Deposits. Nedra Press - Moscow (en ruso).
- IVANOV, V.V., 1968. Overall estimates of the average trace element content of principal ore minerals. Dokl. Akad. Nauk SSSR, vol. 186, 1: 185-186.
- IVANOV, V.V. and YUSHKO-ZAKHAROVA, O.E., 1977. Deposits of dispersed elements in Ore Deposits of the USSR (Smirov Ed.), vol. III: 479-491.
- KOBE, H.W., 1977. El grupo Pucará y su mineralización en el Perú Central. Bol. Soc. Geol. Perú, vol. 55-56: 45-60.
- LEHNE, R.W. und AMSTUTZ, G.C., 1978. Neue Beobachtungen in der Pb-Cu-Zn-Ag Lagerstätte Colquijirca, Zentral Peru. Münster Forsch. Geol. Paläont., 44/45: 173-178.
- LEHNE, R.W., 1979. Nuevos aspectos acerca del yacimiento de Colquijirca. Revista CETIM, Lima : 18-21.
- LEVIN, P. y SAMANIEGO A., A., 1975. Los sedimentos del grupo Pucará en el área de Chanchamayo - Perú Centro-Oriental. Bol. Soc. Geol. Perú, vol. 45: 45-60.
- LEVIN, P. und AMSTUTZ, G.C., 1976. Kristallisation und Bewegung in Erzrhythmiter am Beispiel triassisch-jurassischer Lagerstätten im Ost-Peru. Münster Forsch. Geol. Paläont., 38-39: 111-128.
- Mc INTIRE, W.L., 1963. Trace element partition coefficients - a review of theory and applications to geology. Geoch. Cosmoch. Acta, vol. 27: 1209-1264.
- Mc LAUGHLIN, D.H., 1924. Geology and physiography of the Peruvian Cordillera, departments of Junín and Lima. Geol. Soc. Amer. Bull., 35: 591-632.
- MEGARD, F., 1973. Etude géologique d'une transversale des Andes au niveau du Pérou Central. These d'Etat, Univ. Montpellier, 263 p.
- MEGARD, F., 1978. Etude géologique des Andes du Pérou Central. Memoire ORSTOM, Paris, 310 p.
- PETERSEN, U., 1965. Regional geology and major ore deposits of Central Peru. Econ. Geol., vol. 60(3): 407-476.
- PETERSEN, U., 1982. Estudios cuantitativos del zonamiento hidrotermal. Sem. Explor. y Metalog. Yacim. Metal. UNI Lima, Enero 1982, 81 p.
- PONZONI, E., 1982. Metalogenia del Perú (en publicación - 36 p.)
- SAMANIEGO A., A., 1981. Stratabound Pb-Zn (Ag-Cu) ore occurrences in Early Cretaceous sediments of North and Central Peru. A contribution to their Metallogenesis. Tesis Doctorado, Univ. Heidelberg, 209 p.
- SILBERMAN, M.L. and NOBLE, D.C., 1977. Age of igneous activity and mineralization, Cerro de Pasco, Central Peru. Econ. Geol., vol. 72(6): 925-930.
- STEINMANN, G., 1929. Geologie von Peru. Carl Winter, Heidelberg, 448 p.
- VERA, F., 1978. Geología del distrito minero San Cristóbal. Informe privado, Centro-mín Perú, 28 p.
- VLASOV, K.A., editor, 1964. Geoquímica, mineralogía y tipos genéticos de los yacimientos de elementos raros (en ruso). Nauke Press, Moscow, 3 tomos.

WU, I. and PETERSEN, U., 1977. Geochemistry of tetraedrite and mineral zoning at Casapalca, Perú. Econ. Geol., vol. 72: 993-1016.