

## METALES MENORES Y TRAZAS ASOCIADOS AL PLOMO Y AL ZINC EN LOS YACIMIENTOS POLIMETALICOS DE LOS ANDES PERUANOS: SINTESIS REGIONAL

P. Soler \* / M.A. Lara M. \*\*

### RESUMEN

Con el propósito de estudiar las distribuciones de elementos menores y trazas (Ag, Au, Bi, Se, Cd, In, Ge, Ga, Sn, Ni, Co) en los yacimientos de Pb-Zn de los Andes peruanos, han sido analizadas más de 1400 muestras procedentes de cerca de 90 yacimientos polimetálicos ubicados entre Cajamarca al Norte y Puno al Sur (7° a 16°S).

Las distribuciones observadas pueden ser interpretadas en base a cuatro factores: tipo de yacimiento, condiciones físico-químicas de formación de las menas, edad y naturaleza de las rocas encajonantes, anomalías regionales.

Dentro del grupo de los yacimientos genéticamente ligados al magmatismo andino terciario, caracterizados por leyes de Ge muy bajas, se distinguen:

- Los yacimientos de alta temperatura (skarns) con altas leyes de Bi, Se y Co. Forman un grupo geoquímicamente bastante homogéneo.
- Los yacimientos mesotermales a epitermales con altas leyes de Ag y leyes bajas de Bi, Ga e In. Excepcionalmente pueden presentar leyes notables de Ge. Forman un grupo poco homogéneo.

Dentro del grupo de los yacimientos estratoligados se distinguen:

- Los yacimientos sin volcanismo asociado de la base del Mesozoico (grupo Pucará) con leyes altas de Ge y Cd.
- Los yacimientos "sedimentario-hidrotermales" con volcanismo asociado de la base del Mesozoico (grupo Pucará) con leyes fuertes de In.
- Los yacimientos estratoligados dentro de la formación Santa (Valanginiense superior) muestra un quimismo parecido al de los yacimientos hidrotermales terciarios. Su origen, sedimentario-hidrotermal durante el Valanginiense o hidrotermal Terciario, está discutida.
- Los yacimientos estratoligados del distrito de Hualgayoc presentan anomalías positivas en Ge y Ga. Dicha anomalía se encuentra también en los yacimientos filonianos de la zona Norte; se trata al parecer de una anomalía regional independiente del tipo de yacimiento. La geoquímica de las trazas no da elementos de juicio respecto al origen de los yacimientos del distrito de Hualgayoc.

\* Orstom, La Mariscale 115 Lima 27 y 24 rue Bayard 75008 París (Francia)

\*\* INGEMMET, Pablo Bermúdez 211 Jesús María - Lima-Perú

ORSTOM Fonds Documentaire

N° 41864 P. 1

Cote : B

147

17 JUL. 1995

En el Centro, los yacimientos encajonados en el Paleozoico o influenciados por éste, muestran abundancia relativa de In, Ga y Sn, leyes muy bajas 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 y Sn.

## INTRODUCCION

Con el propósito de estudiar la distribución de elementos menores y trazas (Ag, Au, Bi, Se, In, Ge, Ga, Sn, Ni, Co...) en los yacimientos de Pb-Zn-(Ag)-(Cu) del Perú, 89 yacimientos polimetálicos han sido muestreados a lo largo de la Cordillera de los Andes Peruanos, principalmente en sus partes Central y Norte (desde Cercapuquio hasta Hualgayoc) así como en su parte Sur (zona de Puno) (ver figura 1).

Un total de 1400 muestras procedentes de estos yacimientos han sido analizadas, tratándose de muestras de menas esencialmente y de cabezas de planta, concentrados y relaves. No se realizaron análisis de los minerales que constituyen las menas.

El propósito del estudio, más allá del interés económico que pueda presentar, es de establecer cuáles son los factores que controlan las distribuciones de estos elementos menores y trazas, los mismos que pueden ser la ubicación geográfica del yacimiento, su tipo metalogénico, las asociaciones minerales, su edad, la edad y litología de su encajonante, la edad de los intrusivos,... También se plantea el problema inverso, o sea analizar si el conocimiento del "espectro" de elementos menores y trazas de un yacimiento nos puede dar elementos de juicio en cuanto a la metalogenia de dicho yacimiento (tipo, geometría...).

En la presente publicación, centraremos los comentarios sobre las distribuciones de Ag y Bi así como de Cd, In, Ge y Ga.

## I. CUADRO METALOGENETICO

Sin entrar en detalles de morfología, paragénesis y génesis se puede considerar que los yacimientos de Pb-Zn del Ande peruano se agrupan en cuatro familias.

- a) Los yacimientos estratoligados en las calizas y dolomias del grupo Pucará (Trias-Lias). Dicha familia está constituida por dos grupos: un grupo parecido al tipo "Mississippi Valley" (San Vicente, Shalipayco, Gran Bretaña, Malpaso...) (grupo "Pucará I") y un grupo volcano-sedimentario (Carahuacra, Huaripampa,...) (grupo "Pucará II").
- b) Los yacimientos estratoligados en las calizas de la formación Santa (atribuida al Valanginiano Superior) (Huanzalá, El Extraño, Pachapaqui, Tuco-Chira...).
- c) Los yacimientos estratoligados del Albiano medio del Norte de Cajamarca, es decir los yacimientos del distrito de Hualgayoc. Hablamos de estratoligados en términos puramente morfológicos. Para la familia (a) el origen sin-diagenético está claramente establecido mientras que para los grupos (b) y (c) las discusiones genéticas son todavía muy intensas.
- d) La cuarta familia, la más importante económicamente y la más estudiada geológicamente, está constituida por los yacimientos epigenéticos, no congruentes respecto al encajonante

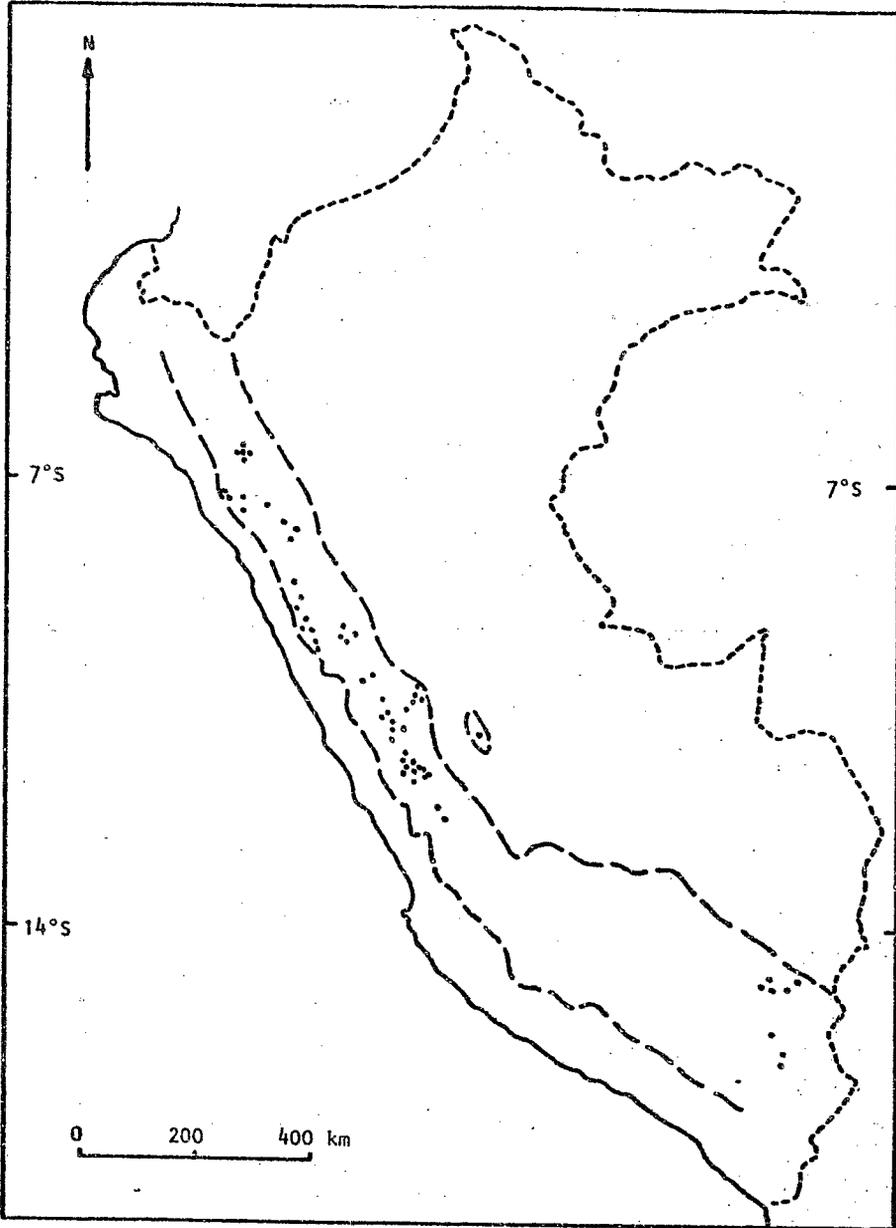


FIGURA 1 : Ubicación de los principales yacimientos muestreados

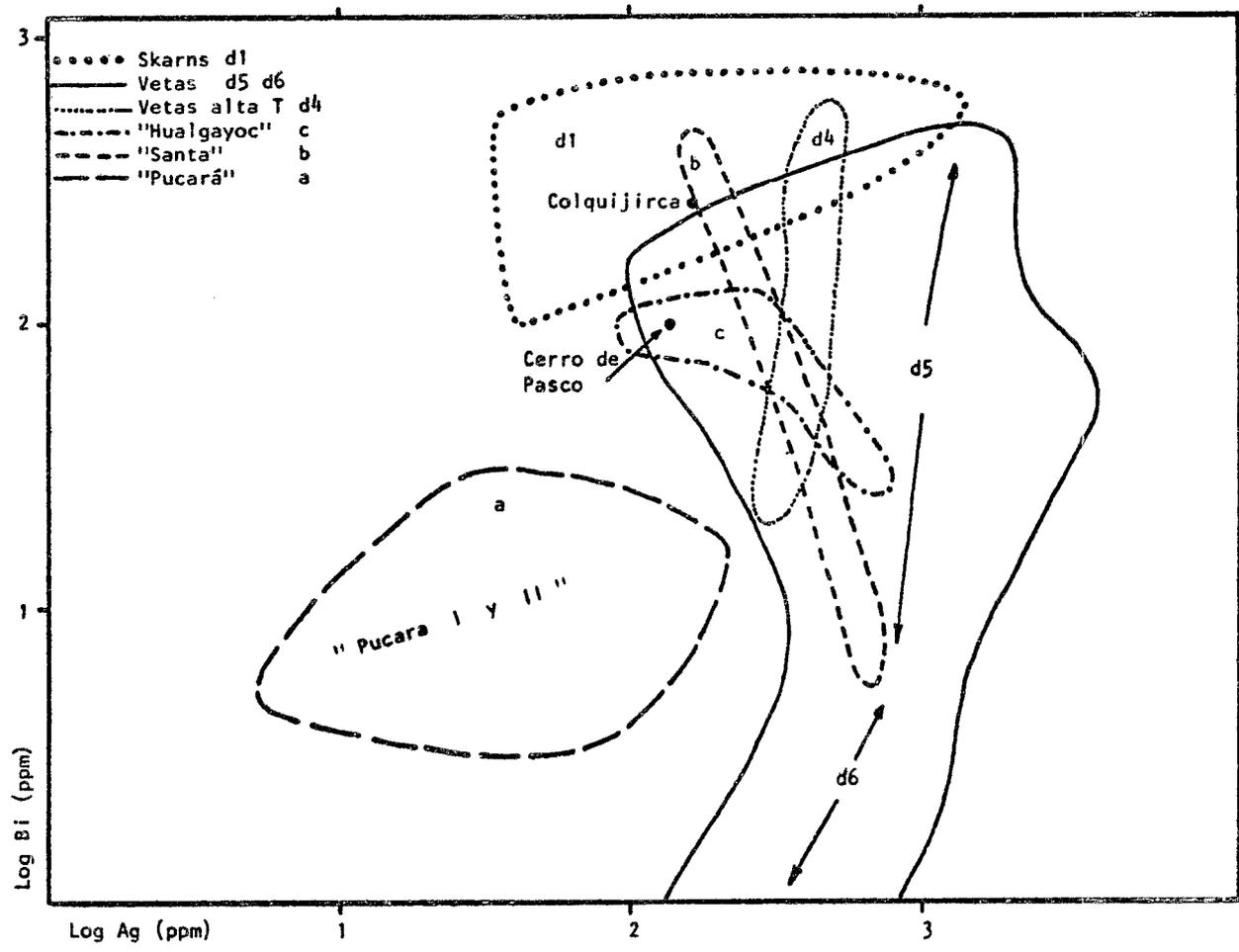


FIGURA 2 : Diagrama Log Ag - Log Bi

y genéticamente ligados al magmatismo Miocénico. Dentro de esta familia se puede distinguir grupos en función a la morfología, a las condiciones físico-químicas de formación de los yacimientos y a las asociaciones minerales; comúnmente se distinguen:

- d1) Los yacimientos pirometasomáticos (o sea en ganga de skarn) conocidos principalmente en la parte central de los Andes peruanos: Milpo, Santander, Chungar, Atacocha (por parte), Raura (por parte), Morococha (por parte), Yauricocha, Antamina...; son yacimientos a menudo complejos que presentan, además de cuerpos mineralizados en skarns, mineralizaciones mesotermales hasta epitermales en vetas.
- d2) El yacimiento de Cerro de Pasco por su morfología y tamaño constituye por sí un grupo.
- d3) El yacimiento de Colquijirca, por su morfología estratoligada, única dentro de la familia (d), constituye por sí mismo un grupo.

El grupo más importante, dentro de la familia (d), está constituida por los yacimientos filonianos. En los extremos de este grupo, encontramos por un lado los yacimientos de alta temperatura, generalmente asociados a greisen (yacimientos de W: Pasto Bueno, Palca 11,... y de Sn: San Rafael, Carabaya...) en los cuales Pb y Zn están presentes pero subordinados) (d4) y por otro lado los yacimientos epitermales con Pb y Ag dominantes y Zn subordinado (Millotingo, Alpamarca, Machacala, Salpo,...) (d6); el grupo más importante siendo aquel constituido por los innumerables yacimientos filonianos mesotermales (Casapalca, Huarón, Quiruvilca, Pacococha, Alianza, Santo Toribio, Chuvilca,...) (d5).

No entra en el cuadro de la presente publicación detallar la geología, metalogenia y mineralogía de dichos yacimientos.

En la presente síntesis de la metalogenia del Pb-Zn en el Perú no hemos incluido los yacimientos de Ba-Zn genéticamente ligados al vulcanismo Casma de la Costa. Dichos yacimientos han quedado fuera de nuestro estudio.

## II DISTRIBUCIONES DE LA PLATA Y BISMUTO

En la figura 2 (diagrama Log Ag-Log Bi) están ploteados los diferentes grupos antes definidos (considerando para cada yacimiento el promedio de los análisis de las muestras de mena). Este diagrama ilustra varias conclusiones:

- Los yacimientos estratoligados del Pucará (a) se distinguen nítidamente por sus leyes de Bi muy bajas (del orden de 10 ppm) y sus leyes de Ag bajas. En esta familia los grupos I y II (antes definidos) se diferencian por una razón Zn/Pb de 5 a 10 y 20 o más respectivamente y por una ley de Sn de menos de 100 ppm y del orden de 200 ppm respectivamente.
- En cuanto a las leyes de Ag y Bi los yacimientos del Santa (b) y de Hualgayoc (c) no se distinguen de los yacimientos filonianos mesotermales del Mioceno (d5). En ambos grupos (b y c) se nota una correlación negativa Ag-Bi.
- Dentro de los yacimientos ligados al magmatismo Miocénico, el grupo de los yacimientos pirometasomáticos (d1) se distingue por su homogeneidad, sus altas leyes de Bi (200—

1000 ppm) y sus leyes relativamente bajas de Ag. Al contrario, los yacimientos filonianos muestran una extrema variabilidad en cuanto a sus leyes de Bi y, en un grado menor, de Ag; esto refleja el amplio espectro de condiciones térmicas y químicas de formación de estos yacimientos. Sin embargo es de notar una gruesa correlación entre ley de Bi y temperatura de formación del yacimiento, siendo más alta la ley de Bi a temperatura más elevada de formación. Es de notar que los yacimientos ricos en Ag (más de 1000 ppm) se encuentran en los grupos d5 y d6 (yacimientos meso a epitermales en vetas).

### III DISTRIBUCIONES DEL CADMIO, DEL INDIO, DEL GERMANIO Y DEL GALIO

Consideramos cuatro oligo-elementos que tienen un coeficiente de partición, entre sulfuros, tan favorable para la esfalerita que hemos considerado, en primera aproximación, que en las menas, se encuentran exclusivamente en este mineral.

La tabla siguiente da las órdenes de magnitud de las leyes de Cd, In, Ge y Ga encontradas en los concentrados de Zn.

	Máxima (ppm)	Yacimientos	Mí Mínima (ppm)	Yacimientos
Cd	8900	El Extraño	1300	Santander
	5840	Sayapullo	1540	Pasto Bueno
			700	Carahuacra
In	290	Carahuacra	≤ 10	San Vicente
	240	Morococha		Gran Bretaña
	240	Sayapullo		Shalipayco
Ge	310	Sayapullo	< 10	Cerro de Pasco, Milpo,
	130	Shalipayco		Atacocha, Pasto Bueno,
	90	Gran Bretaña		Casapalca
Ga	855	Sayapullo	6	Shalipayco
	240	Hualgayoc	8	San Vicente
			12	Gran Bretaña

#### III. 1 Distribución del Germanio

En la figura 3 (diagrama Log In-Log Ge) están ploteados los diferentes grupos antes definidos. Este diagrama ilustra varias conclusiones:

- La familia (a) se divide en dos grupos. El grupo "Pucará I" se caracteriza por altas leyes de Ge; está constituido por los yacimientos tipo "Mississippi Valley" (San Vicente, Salipayco, Gran Bretaña,...). El grupo "Pucará II" se caracteriza por leyes bajas de Ge; está constituido por los yacimientos del domo de Yauli (Carahuacra, Huaripampa). Es de notar que esta división en dos grupos de los yacimientos del "metalotecto Pucará" no corresponde a la división propuesta por otros autores (Amstutz, 1983,...) que consideran un tipo A en secuencia transgresivas de borde de cuenca (Shalipayco, Malpaso y Carahuacra-Huaripampa) y un tipo B en potentes paquetes de calizas y dolomitas c

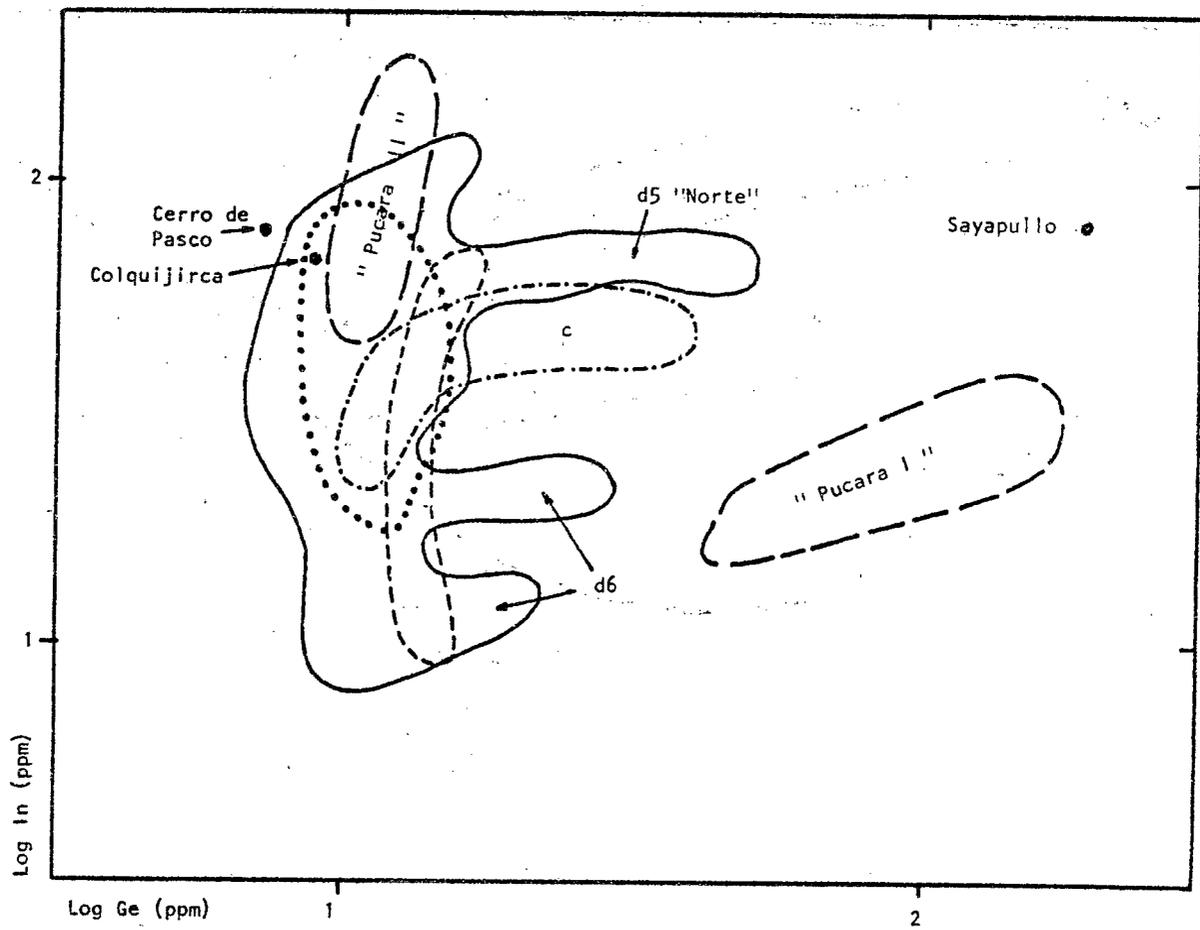


FIGURA 3 : Diagrama Log Ge - Log In (símbolos como en figura 2)

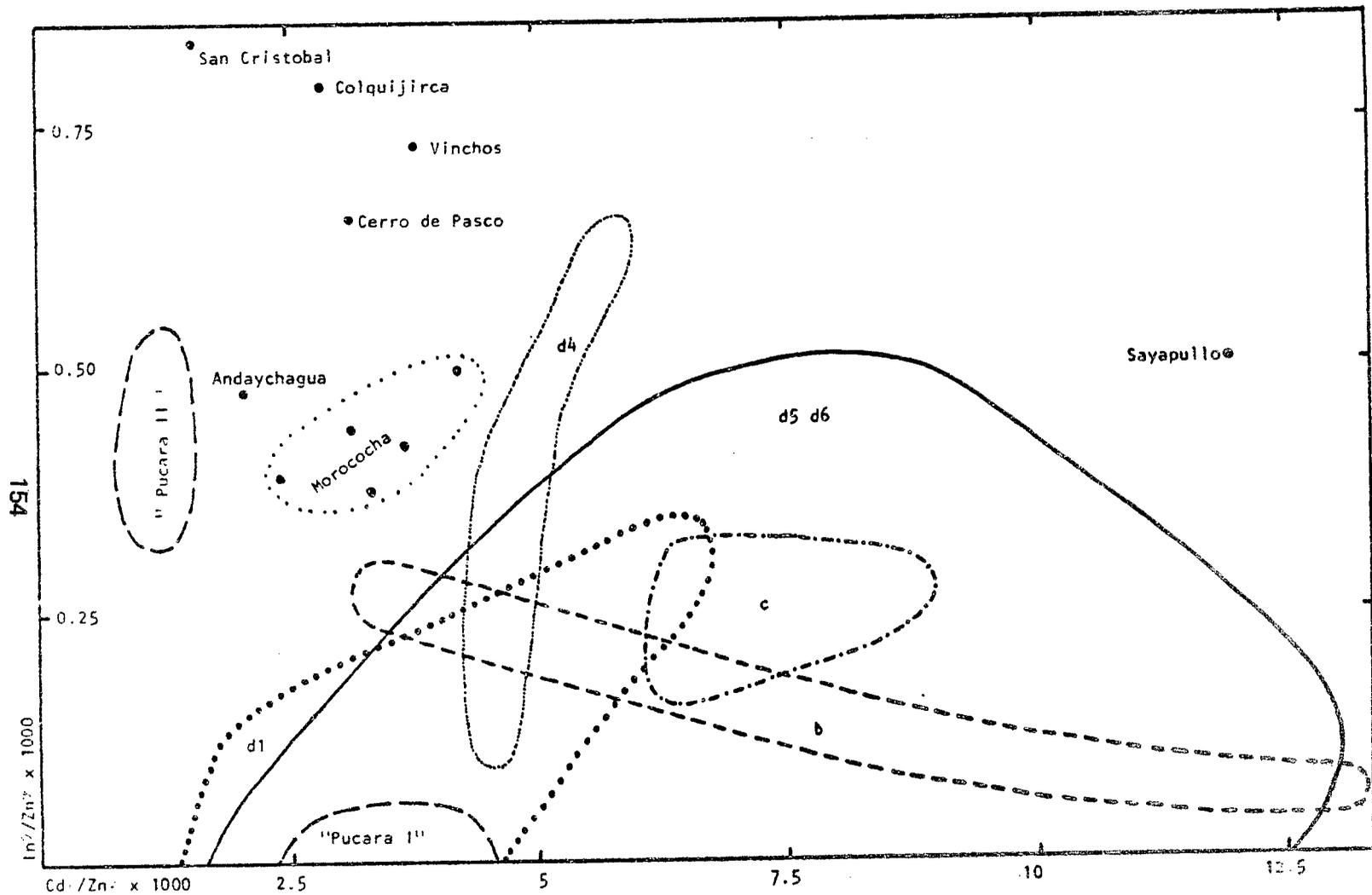


FIGURA 4 : Diagrama Cd/Zn - In/Zn (símbolos como en figura 2)

pa) y un tipo B en potentes paquetes de calizas y dolomitas como San Vicente. La distinción geoquímica que hacemos corresponde a la existencia de una relación genética al volcanismo (caso del grupo II) o a su no existencia (caso del grupo I). Es de notar que la existencia de altas leyes de Ge es un rasgo "clásico" de los yacimientos de tipo "Mississippi Valley".

- Los yacimientos del distrito de Hualgayoc (c) se distinguen también por leyes de Ge elevadas, aunque en un menor grado que los yacimientos del grupo "Pucará I". Pero en los yacimientos filonianos mesotermales del Norte (Sayapullo —excepcional por su ley de Ge—, Chuvilca, Quiruvilca,...) se observan también leyes notables de Ge. Se plantea entonces el problema de saber si los yacimientos de Hualgayoc se distinguen por ser presentes en una zona donde haya una anomalía regional positiva en Ge, cuyo origen queda por esclarecer, o por ser singenéticos (volcano-sedimentarios). Observando que los yacimientos sedimentarios volcanogénéticos (grupo Pucará II y grupo (b) presentan leyes de Ge bajas, consideramos que las altas leyes de Ge en Hualgayoc están relacionadas a una anomalía de carácter regional y que, en el caso de Hualgayoc, la geoquímica del Ge no nos da elementos de juicio en cuanto al origen de los yacimientos.
- Los yacimientos del Santa (b) no se distinguen de las vetas (d5).
- Los yacimientos pirometasomáticos (d1) se distinguen nuevamente por formar un grupo bastante homogéneo con leyes bajas de Ge ( $< 10$  g/t).
- Los yacimientos filonianos presentan generalmente leyes bajas a muy bajas de Ge ( $< 10$  g/t), caso aparte de los yacimientos mesotermales del Norte, ya citados, y de unos cuantos yacimientos epitermales de Ag del Perú Central (en particular Alpamarca y varios yacimientos chicos de la Cordillera Negra) que presentan leyes notables de Ge.

### III.2 Distribución del Indio, del Cadmio y del Galio

Las figuras 3 (diagrama Log Ge - Log In), 4 (diagrama Cd/Zn - In/Zn) y 5 (diagrama Cd-In-Ga) ilustran las diferentes observaciones y conclusiones:

- Los grupos "Pucará I" y "Pucará II" se distinguen uno del otro por las leyes de In (bajas para Pucará I, altas para Pucará II), las leyes de Cd (muy bajas para Pucará II, bajas a medianas para Pucará I) y las leyes de Ga (muy bajas para Pucará I, bajas para Pucará II). En términos de leyes relativas de Cd-In-Ga (figura 5), el grupo Pucará I se caracteriza por leyes relativas de Cd muy altas, leyes relativas de In bajas y leyes relativas de Ga muy bajas mientras que el grupo Pucará II se caracteriza por leyes de Cd bajas, leyes relativas de In altas a muy altas y leyes relativas de Ga bajas a medianas.
- Los yacimientos del Santa (b) son geoquímicamente muy parecidos a los yacimientos filonianos (d5 - d6), no obstante se distinguen por una ley relativa de In muy baja (diagrama 5) y una correlación negativa In-Cd (diagrama 4).
- Los yacimientos de Hualgayoc (c) no se distinguen de los yacimientos filonianos (d5 - d6) salvo en cuanto a sus leyes relativamente de Ga generalmente altas y sus leyes relativas de In bajas. Nuevamente se plantea la posibilidad de existencia de una anomalía regional positiva en Ga y negativa en In (en términos relativos) pues los yacimientos filonianos del

Norte (en particular Sayapullo) presentan los mismos rasgos que los yacimientos de Hualgayoc.

- Los yacimientos pirometasomáticos (d1) se caracterizan por una gran homogeneidad geoquímica con leyes medianas a bajas de Cd, In y Ga, leyes relativas de In y Ga medianas y leyes relativas de Cd medianas a altas (diagrama 5).
- En los otros yacimientos filonianos meso a epitermales (d5 y d6) las dispersiones de las leyes de Cd, In y Ga son muy fuertes. Aparece un subgrupo, constituido por los yacimientos de Morococha, San Cristóbal, Andaychagua, Vinchos, Cerro de Pasco, Colquijirca, ... que presentan leyes de Cd bajas y leyes de In elevadas (diagramas 4 y 5). Estos yacimientos comparten esta anomalía geoquímica con los yacimientos del grupo "Pucará II". Lo que tienen en común todos estos yacimientos es que o están encajonados en el Paleozoico Inferior (grupo Excelsior) del Centro o se encuentran muy próximos a dicho sócalo. Es de agregar que además de estas anomalías, estos yacimientos presentan anomalías positivas en Sn y Ga, aunque en grado menor que para In, y anomalías negativas en Se.

Estas anomalías están limitadas a la zona central de los Andes, lo que no significa que éstas sean de carácter regional; los otros yacimientos del Perú Central no presentan estas anomalías, que a nuestro juicio corresponden a la presencia del Paleozoico Inferior. Los yacimientos encajonados en el Mesozoico y el Cenozoico presenta una tendencia a leyes elevadas de Se y Cd y a leyes bajas de In, Ga y Sn. Desarrollamos en las conclusiones, las consecuencias de estas observaciones.

#### IV. CONCLUSIONES

Hemos logrado mostrar que, básicamente existen cuatro factores que permiten explicar las distribuciones de los elementos menores y trazas en los yacimientos polimetálicos del Perú:

- El factor principal es el tipo metalogenético del yacimiento que nos ha permitido clasificar los yacimientos de la base del Pucará en dos grupos distintos, uno volcánogenético otro sin volcánismo asociado; ambos grupos se distinguen del conjunto de los demás yacimientos.

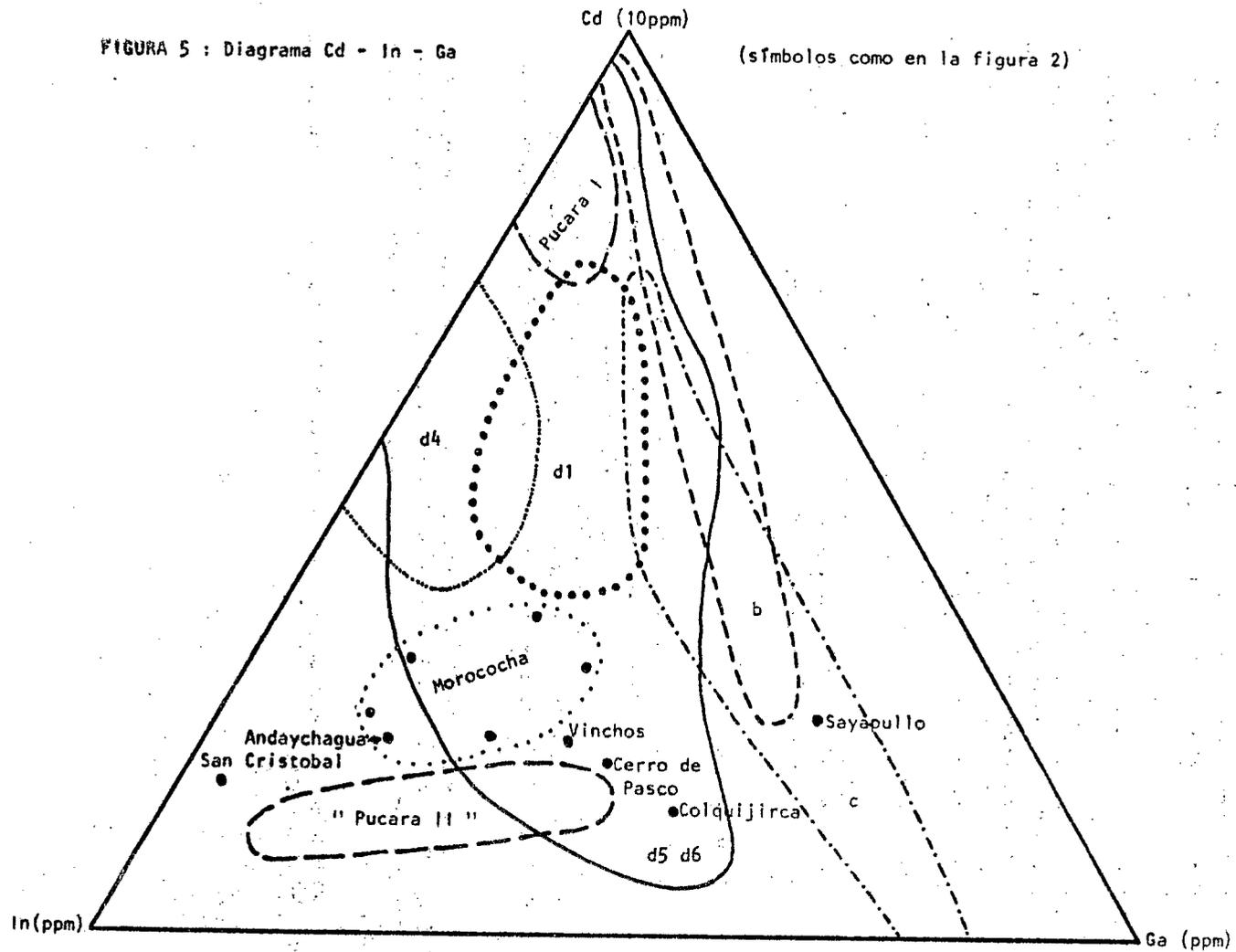
El tipo "Pucará K" (parecido al tipo "Mississippi Valley" está caracterizado por su altas leyes de Ge, sus leyes bajas de Bi, Ag e In, sus leyes relativas bajas de Ga e In y sus leyes relativas altas de Cd.

El tipo "Pucará II" (volcánogenético) está caracterizado por sus altas leyes de In, sus bajas leyes de Cd, Ga, Ag, Bi y Ge.

El factor "tipo metalogenético" es explicativo también para la homogeneidad del grupo de los yacimientos pirometasomáticos (leyes bajas de homogeneidad del grupo de los yacimientos pirometasomáticos (leyes bajas de Ag y Ge, leyes bajas a medianas de Cd, In y Ga, leyes fuertes de Bi, Se y Co); dicha homogeneidad geoquímica refleja a la vez las similitudes en las condiciones físicas de formación de estos yacimientos (condiciones de metasomatismo de contacto) y la similitud geoquímica de los stocks intrusivos calcoalcalinos responsables de estas mineralizaciones.

FIGURA 5 : Diagrama Cd - In - Ga

(símbolos como en la figura 2)



- El factor "temperatura de formación" explica, además de la homogeneidad del grupo "pirometasomático", las variaciones de Bi y Hg en los yacimientos filonianos (correlación positiva Bi-Temperatura y correlación negativa Hg-Temperatura). Es de notar que este factor no explica las distribuciones de Cd, In y Ga en los yacimientos filonianos, caso aparte de la homogeneidad del grupo de los yacimientos "pneumatolíticos".
- El factor "edad y naturaleza" del encajonante nos ha permitido separar los yacimientos encajonados en el Paleozoico (caracterizados por altas leyes de In, Ga y Sn y leyes bajas de Cd y Se) de los yacimientos encajonados en el Mesozoico y el Cenozoico (caracterizados por leyes relativamente elevadas de Se y Cd y por leyes bajas de In, Ga y Sn). Estas diferencias geoquímicas entre yacimientos de la misma edad, de tipo metalogénicos similares, ligados a intrusiones calco-alcalinas sub-contemporáneas, nos permiten suponer que parte de los fluidos mineralizantes tienen su origen en el encajonante mismo de los yacimientos. Tres niveles portadores de Cd y Se conocidos en el Mesozoico; el origen de Sn, In y Ga "extraídos" del Paleozoico inferior queda por esclarecer.
- El factor geográfico (o sea ubicación de los yacimientos) carece por lo general de importancia; sin embargo, hemos mostrado la existencia de una anomalía regional positiva en Ge y Ga en la parte Norte de la provincia polimetálica peruana, cuyo origen queda por esclarecer.

#### AGRADECIMIENTOS

El estudio de las distribuciones de elementos menores y trazas en los yacimientos polimetálicos del Perú se desarrolla en el cuadro del Convenio de Acción Conjunta entre el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú y el Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer (ORSTOM) de Francia. Agradecemos a los señores ingenieros F. Sotillo P. y G. Flores N., Director Ejecutivo y Director General de Geología del INGEMMET respectivamente por haber apoyado el proyecto y autorizado la publicación del presente trabajo.

El conjunto de los análisis se realizaron en el cuadro de un Convenio entre ORSTOM y la Société Minière et Métallurgique de PEÑARROYA. Agradecemos al personal del laboratorio de Peñarroya en Noyelles-Godault (Francia) y a los geólogos de dicha campaña por su decidido apoyo.

Los trabajos de campo se realizaron con fondos de ORSTOM y de las compañías mineras HUARON S.A. y MILPO S.A.