22

YACIMIENTOS DE ORO EMPLAZADOS EN EL ORDOVICICO DE LAS CORILLERAS DE APOLOBAMBA Y REAL: VETAS DE CUARZO ASOCIADAS A SULFUROS MACIVOS.

Michael FORNARI*

(ORSTOM)

I. INTRODUCCION

Las mineralizaciones de la Cordillera Oriental forman una provincia que se extiende mas de 300 Km de largo desde los alrededores de Cuzco (Cordilleras de Vilcabamba) en el Perú hasta el Este de La Paz en Bolivia (fig. 1).

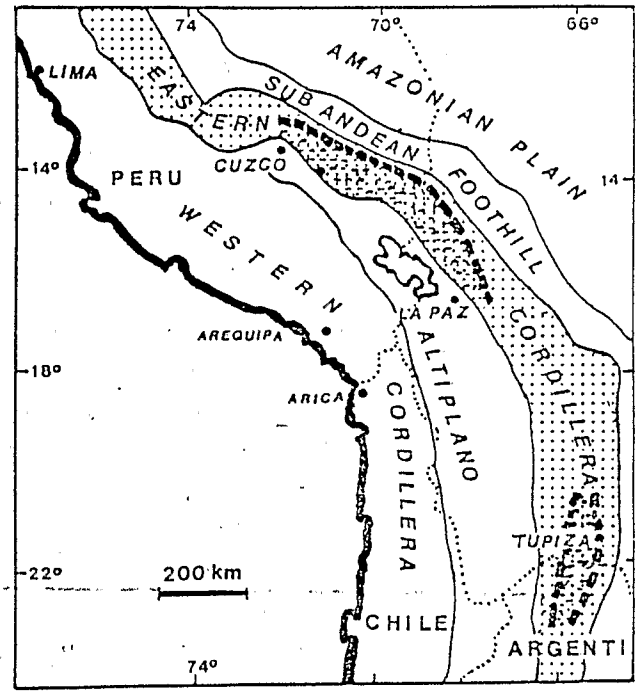


Fig. 1 : Ubicación de la provincia aurífera en el Paleozoïco inferior de la Cordillera Oriental de los andes Centrales, (Sur Perú y Bolivia).

Fig. 1 : Location of the Paleozoic gold province in the Eastern Cordillera of the central Andes (Southern Perú and Bolivia).

En la parte peruana, las minas e indicios de oro se disponen en una faja más discontinua que en Bolivia; hay grupos principales de minas o indicios de mineralización cerca de Cuzco, cerca de los pueblos de Ocongate (Mina Manco Capac) y Ollachea; una faja se sigue a lo largo del rio Inanbari

* tratandose del texto dictado en el cursillo de geologia de yacimientos de oro, las ilustraciones presentadas en slides no puede incluirse.

Fonds Documentaire IRD
010021831

Fonds Documentaire IRD
Cote : B✱ 21831 Ex : 1

(Candelaria, Media Naranja, Benditani, Santo Domingo) hasta cerca los alrede dores del pueblo de Sandia y otros aparecen en la zona de Ananea extendiendose hasta la frontera con Bolivia (fig 2).

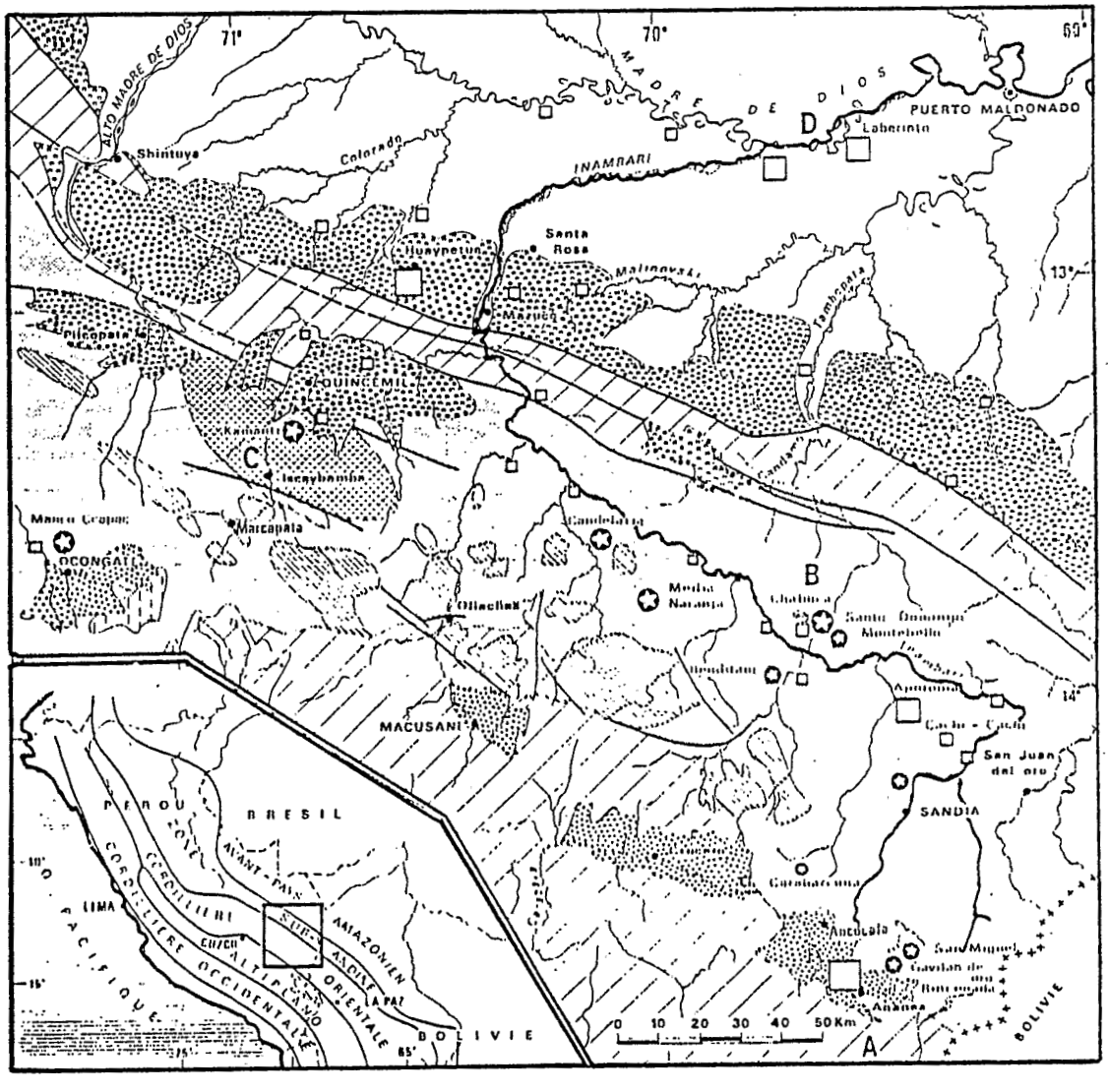


Fig 2 : Localización de los principales sitios auriferos del Sur del Perú (9= en roca, 10 = en placeres).

Fig. 2 : Mains gold ocurrences in Southern Peru (9 = rock-hosted gold showings, 10 = main gold placers).

En Bolivia continuan los indicios en el C° Palomani, cerca de la laguna Suches, Lavanderani en las cabeceras del rio Pelechuco, Chunchuli, Huarachani, en las cabeceras del rio Sorapata pasando a la zona famosa de Aucapata-Yani, en las cabeceras de los rios Consata y Tipuani donde hay concentración de vetas e indicios de Aucapata, Santa Barbara, Lacayani, Silusani, La Suerte, Fortaleza, etc. (fig. 3); otros indicios están en las cabeceras de los rio Zongo, Coroico y La Paz.

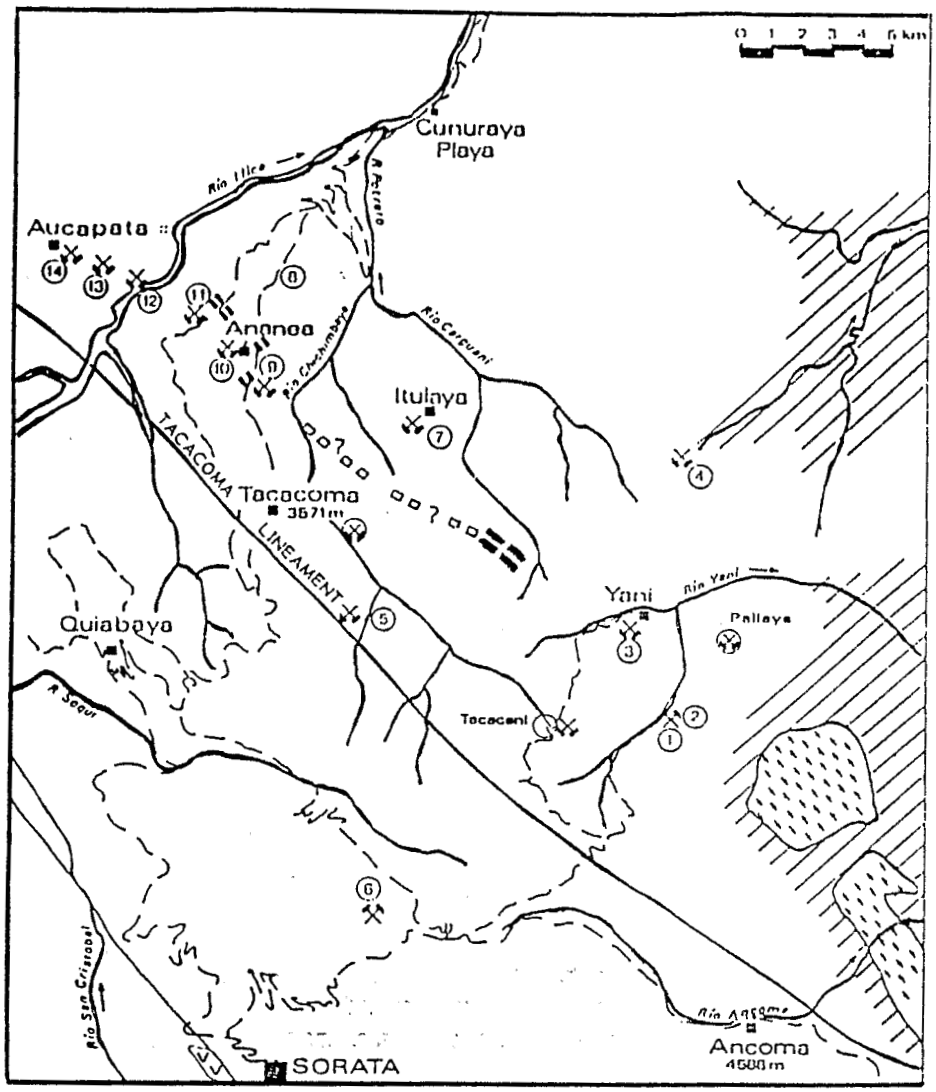


Fig.3 : Mineralazaciones en la parte Norte de la Cordillera Real.1 Mina La Suerte, 2 Fortaleza, 3 Mina Trinidad (Yani), 4 Santo Domingo, 5 San Jorge, 6 Progresiva, 7 Itulaya, 8 Collabamba, 9 Silusani, 10 Ananea, 11 Lacayani, Mina Maria, 13 Santa Barbara, 14 Aucapata (Maucallaja), segun Tilst, 1985.

Fig. 3 : The gold -quartz mineralizations in the northern Cordillera Reakl (from Tilst, 1985).

En Bolivia, vuelven a apareceer ocurriencias auriferas mas al Sur, en la región de Tupiza de tipo vetas de Cuarzo con estibina y oro, siempre en el Ordovicico.

Una característica de todas estas ocurrencias en cuanto a su geologia, es de estr encajonadas en sedimentos de triticos del Paleozoïco inferior (mayormente Ordovicico y hasta Devonico basal) que forman un potente conjunto de varios miles de metros, de alternanacias arenisco-peliticas monótonas. Corresponden a un ambiente de deposición en mares profundos (planicie avisal o pie de talud). Facies de shales negros con abundantes sulfuros (piritas) y materias organo-carbonaceas que indican condiciones reductoras.

El ambiente geotectonico puede compararse a un sistema de rifting continental que afecta parte del continente de Gonduana. La fracturación de la corteza aborto antes de producir un adelgazamiento de la corteza continental, tal como para crear un nuevo fondo oceánico que separaría del escudo brasilero de un continente occidental conocido como el macizo de Arequipa. Sólo algunos sills de lavas básicas a intermedias en el Ordovicico atestiguan rupturas profundas de la corteza.

Las mineralizaciones más conocidas y las únicas explotadas a la fecha son de tipo veta o mantos de cuarzo aurífero; el término de manto se usa por vetas de buzamiento debil, generalmente concordante con la estratificación (equivalente a sills por las rocas volcánicas y sin ninguna implicación genética.

Vamos a considerar el caso de la Rinconada ubicada en la Cordillera de Apolobamba en el Perú, a unos 20 km. de la frontera con Bolivia, pero ejemplos equivalentes se encuentran en Bolivia, por ejemplo en Yani.

La zona de La Rinconada se localiza al pie del nevado Ananea que tiene una altura de 5820 m. En esta area existen un gran numero de estructuras explotadas, conocidas desde tiempos antiguos ya que formaban parte de las minas de los Incas de Calabaya. Podemos mencionar los trabajos de Ana Maria, Tres Amigos, Gavilan de Oro, y también, localizados detrás del nevado de Ananea en las cabeceras de los rios que fluyen del lado amazónico, los trabajos de la comunidad de Untuca, con San Miguel.

Los trabajos se desarrollan desde unos 4800 m. hasta el límite del hielo. Se ha podido notar ciertas galerias españolas que fueron tapadas por el avance glaciar de la crecida de la pequeña edad glaciar del siglo XVIII, y que, de nuevo se encuentran a la luz del día por el retroceso actual de los glaciares.

Actualmente en la zona , la mineralización en vetas y mantos está explotada con medios poco mecanizados; esta forma de trabajar, desarrollada por varios grupos de individuales no permite establecer de manera segura cual es la producción alcanzada, pero esta se estima en 1 Kg. de oro mensual.

II. GEOLOGIA DEL YACIMIENTO.

Las mineralizaciones estan encajonadas en una potenta serie de mas de 1000 m, de alternancias de capas esquisto-areniscosas en bancos de algunos cm. hasta varios m. Forman típicas secuencias de Bouma (de tipo A-B-E o A-E) características de los ambientes turbidíticos. La granulometria general de la serie es fina, sin aportes gruesos. Corresponden al relleno de una cuenca marina establecida sobre el zócalo precambrico entre el craton brasilero al Este de un continente que incluye el actual macizo de Arequipa al Oeste. Los aportes vienen de zonas continentales maduras establecidas al Oeste; la presencia de sills de lavas básicas a intermedias inter-estratificados en los sedimentos, puede interpretarse como indicios de distensión o de rifting incipiente.

Las areniscas finas (de 200 a 400 micras) están compuestas mayormente de cuarzo con escasos fragmentos de plagioclasas y muscovitas (illitas). Los minerales menores más frecuentes son el circon gastado (de 50 micras) y la turmalina. A veces, se notan la monazita, anatasa, esfena y rutilo, concentrados en laminaciones de base de bancos. Los bancos peliticos son compuetos de

muscovitas (40 micras) en una matriz muy fina de cuarzo-cericita. También, se notan niveles particulares de color gris blanco y de granulometria muy fina de origen volcano-sedimentario, probablemente cineritas retrabajadas.

La serie esta poco metamorfizada, aunque las areniscas puedan presentar cierto grado de cristalización pasando a cuarcitas.

En la parte Oeste y Norte de la zona afloran leucogranitos emplazados de forma sincrónica con la tectónica mayor (C° Condorquino y San Francisco) que han desarrollado una franja de metamorfismo intenso con biotita, andalucita y sillimanita.

En toda la serie es característica la presencia de sulfuros; estos son mayormente la pirita y la arsenopirita. La pirita se presenta ya sea en diseminaciones muy finas que siguen las laminaciones de la roca, particularmente en las láminas obscuras ricas en carbono/grafito, o en manchas milimétricas o centimétricas, irregulares, o en cristales subautomorfos aislados de tamaño milimétrico. La arsenopirita, siempre subautomorfa a automorfa es igualmente asociada a la vetillas de cuarzo y zonas cilificadas.

Estructura:

La Cordillera se caracteriza por la presencia de una deformación tectónica marcada en particular por una esquistosidad que acompaña a los pliegues y localmente por un metamorfismo regional atrubuidos a la tectónica Eo-ercínica de edad Deboníco superior carbonífero superior (Martinez et al., 1971). Hemos encontrado una fuerte deformación, puesta en evidencia por grandes pliegues echados y atambien numerosos contactos anormales de tipo cizalla.

En la zona hemos diferenciado dos unidades tectónicas (fig 4):

En la primera, o "unidad cabalgante", presenta capas en posición estratigráfica normal de orientación este-oeste con un buzamiento de promedio de unos 15° hasta 25° hacia el sur. Las capas están recortadas por una esquistocidad (S1), de dirección casi oeste con busamiento de 10° hasta 30 ° hacia el norte. Criterios de polaridad y microtectónica indican que esta unidad ha sufrido un desplazamiento lateral hacia el sur, la amplitud del desplazamiento queda aún desconocido, pero supera a la docena de Kms. Esta unidad está limitada en su base por una falla de cabalgamiento con el desarollo de brechas tectónicas de varios metros de potencia.

La segunda, o "unidad de escamas", corresponde a pilas de capas en posicion estratigrafica normal o invertida, separadas entre si por fallas de cizallas de busamientos débiles. Los contactos están frecuentemente inyectados de lentes de cuarzo blanco lechosos. La presencia de brachiopodes da una edad Debónica inferior para esta unidad, (Boucot, com escrita 1985). En cambio la unidad superior cabalgante queda todavía azoïca y podemos encarar que sea más antigua, es decir Ordovicica.

Posteriormente se produjo una fase de plegamiento moderado con planos axiales E-W inclinados al norte, que afecta la esquistocidad de flujo S1 y que desarrolla localmente una intensa esquistocidad de tipo crenualción. Diagramas de repartición estereoscópica de delineaciones L1 no presentan una fuerte dispersion lo que indica que las direcciones estructurales de la primera fase ha sido poco modificada por las fases posteriores.

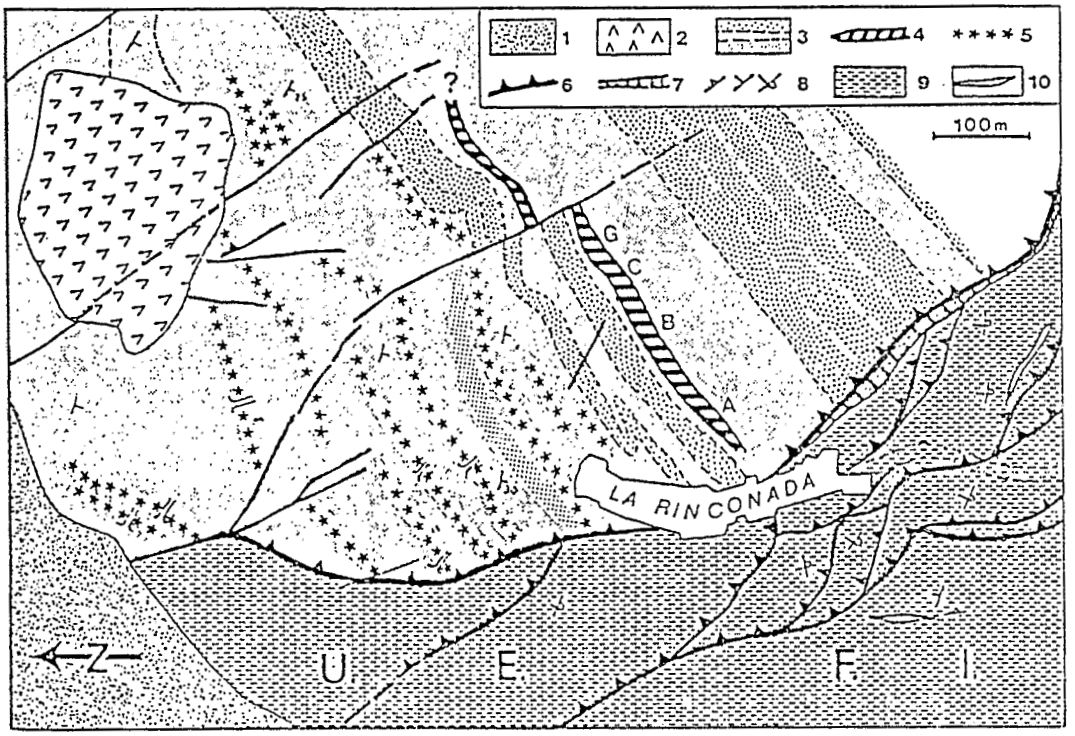


Fig. 4 : Plano geológico de la Rinconada con la posición de criaderos de sulfuros (4) y de los principales mantos (5)

Fig. 4: Geologic map of La Rinconada with the masive sulfide body (4) and the main gold "mantos" (5).

Una diferencia de unos 20° aparece de forma sistemática con las lineaciones entre las dos unidades tectónicas lo que indicaria que una parte del conocimiento entre estas dos unidades estaria en relación con el desarrollo de la esquistocidad mayor.

También se notan fracturas de rumbo, con amplitud generalmente limitada .

Aunque capas del Paleozoico superior y del Meso-Cenozoico con fuertes deformaciones estan expuestas a unas docenas de Kms. al sur, la evaluación de los efectos de las fases tectónicas tardia-ercínicas y andinas es problemática en la zona de la rinconada.

III. LAS MINERALIZACIONES

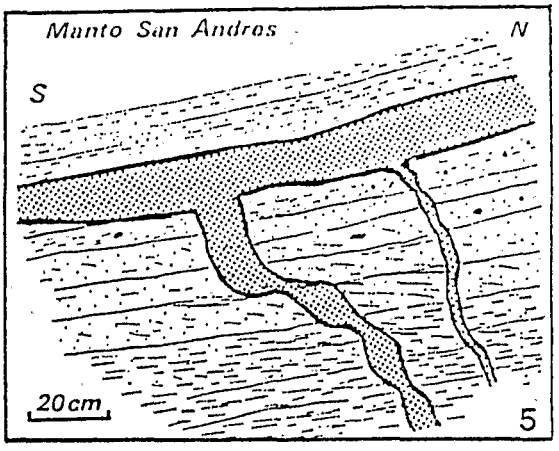
La zona de la Rinconada se caracteriza por la yuxtaposición de dos tipos de mineralizaciones auríferas: Las de cuarzo y las de criadero de sulfuros.

Los facies de cuarzo auríferos:

Se trata de vetas de cuarzo generalmente dispuestas en forma concordante con la estatificación, su potencia varia entre unos cms. y 20 cms. y es debil en relación con la longitud que está entre unos m. a varios centenares de m.

Se nota que todos los mantos identificados están en la unidad cabalgante de sulfuros; además la mayoria de ellos y de los más desarrollados están en el piso en relación con la capa de sulfuros (fig. 4)

Los mantos siguen generalmente los planos de estratificación y a veces incluyen fragmentos de pizarras cuya fragmentación no está perturbada. También existen conecciones con vetillas que nítidamente cortan las estratificación (fig. 5) En algunos casos se observa funciones entre dos mantos separados por algunos metros.



Gold quartz vein, Cutting veins connected with a bedding parallel vein (manto); all contain the same blue-grey quartz with chlorite, pyrite, pyrrhothite, arsenopyrite and gold.

El cuarzo de los mantos y de las vetillas de conexión tienen un aspecto que permite distinguirlo facilmente de otros cuarzos, ya sea el de relleno de facturas posteriores,o el cuarzo de exsudación. El cuarzo de los mantos tiene un color gris azulado con un brillo muy característico,. Incluye playas de clorita, rara epidota y ademas de pirita, pirrotita y arsenopirita. La galena y la calcopirita están en granos de unos 30 - 20 micras. El cuarzo forma grandes cristales alargados por extension ondulosa, alternado con bandas de miero-granos suturados que subrayan la esquistocidad. El oro se encuentra en puntitos aislados y playas que pueden llegar a varios cms. Se encuantan en microfacturas al borde de los granos de cuarzo o al borde de playas de sulfuros. A veces también forman pequeñas inclusiones dentro de los sulfuros, principalmente en la arsenopirita. La ley promedio de los mantos varia de 10 hasta 25 G/T; pero; también la repartición del oro es muy variable, a lo largo del cuarzo, partes sin oro visibles de varias docenas de metros pueden separar las partes mineralizadas.

Se trata de un oro muy puro: análisis por micronda realizados en la Ecol des Mines de París dan una fineza de mas de 880 milésimos, (fig. 6a).

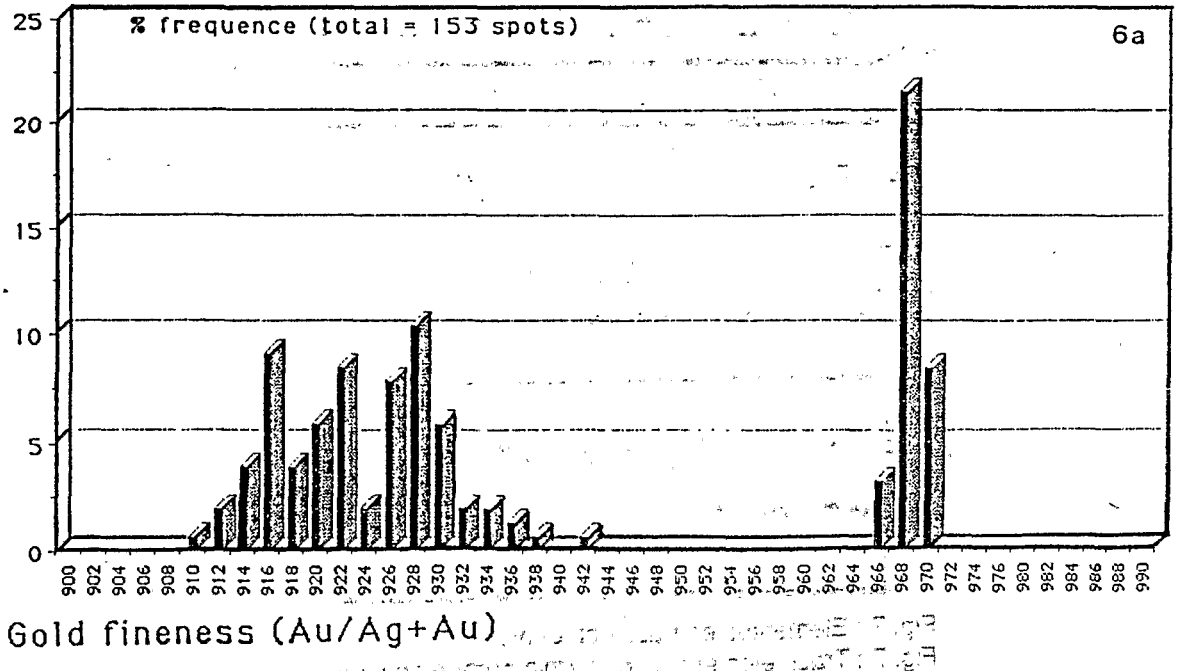


Fig. 6a.: Finesa del oro. *del oro.*

Familias de granos de finesa levemente diferente existen a veces a unos pocos cm. uno de otro; el hecho de que se trata de oro aislado en el cuarzo, o dentro o al borde de granos de sulfuros no parece influir sobre su composición y aunque su relación temporal es dificil de establecer, todos parecen ser contemporáneos. (fig. 6b).

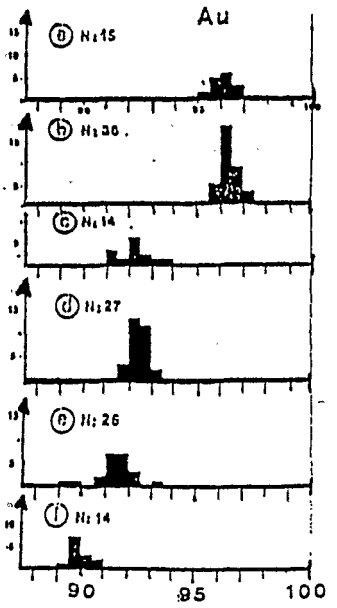


Fig 6b.: Porcentaje de oro en varios granos.

Ademas de la plata se ha investigado la presencia en el oro de elementos tales como Hg, Sb, As, Pb, Sn, Zn, Cu, Fe, Bi, Co, Ni. Solo el cobre (de 0.01 hasta 0.5%) y con menor frecuencia el fierro (de 0.01 hasta 0.2 %) están presentes de manera casi sistemática. El arsénico no es detectado en forma sistemática; llega a 024 % como ley máxima, pero es mas bien comprendida entre 0.03 y 0.01%. No hay correlación directa entre estos elementos trazas en particular, no hay relación Fe-As y una parte del oro con bajo contenido de plata tiene sistemáticamente trazas de Cu. (fig. 7).

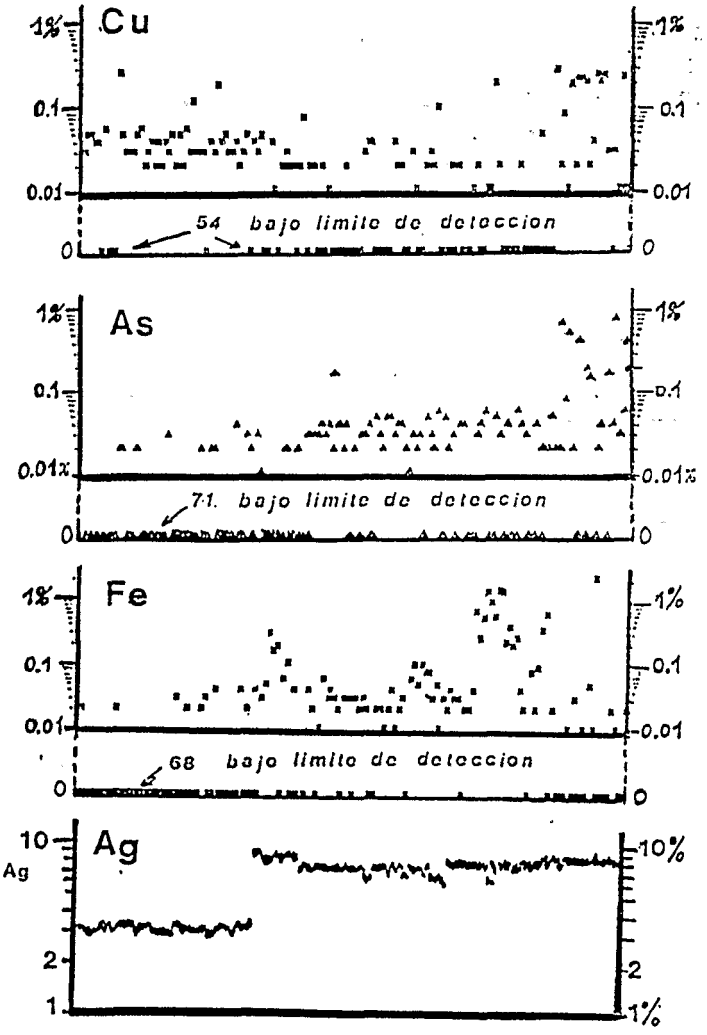


Fig. 7 : Elementos en trazas en el oro
Fig. 7 : Trace elements in gold (microprobe analysis).

En algunos granos se detectó el Bismuto que se presenta en zonas puntuales y corresponde probablemente a micro-inclusiones de tamaño menor al impacto de la sonda (menos de 2 micras). Puntualmente hay tambien leyes en plomo (1.08 - 0.5 %) que podrian corresponder a micro-inclusiones de galena, ya que la galena se observa al borde o dentro de playa de oro. El zinc, antimonio, estaño no fueron encontrados, sino a veces de forma semicuantitativa. el mercurio aparace en muestras de la zona de feeder (grifon).

Las facies sulfuradas y sulfo-arsenicales. (criadero de sulfuros)

Fueron descubiertos en la parte este del pueblo de la Rinconada donde afloran uno 300 m. con una dirección de N 100°E y un en buzamiento de 25 a 30° al Sur. Forman capas heterogeneas de 1 a 2 m de potencia dentro de las pizarras. Presenta tres facies, una facie central masiva con arsenopirita bordada en el piso y en el techo por facies con pirrotita-pirita y esquistos negros piritosos; estas facies se disponen en lentes alargados paralelos a la estratificación (fig. 8).

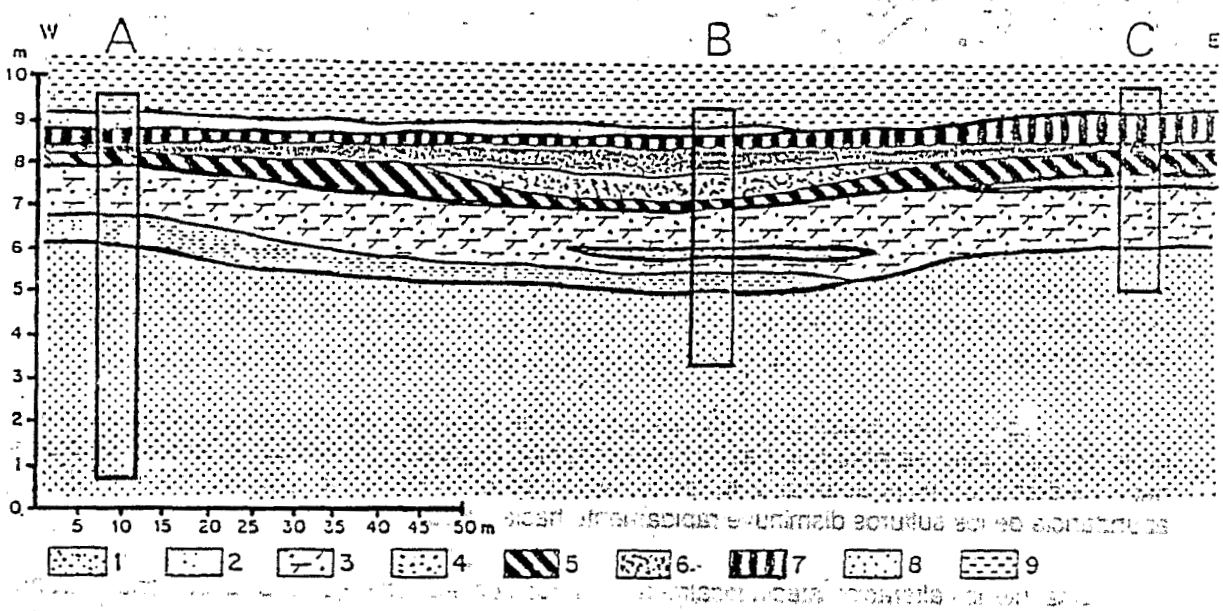


Fig. 8 Disposición lenticular de las facies mineralizadas con sulfuros (5,6,7). 1 y 9 = rocas cajas del piso y del techo.

Fig. 8 Lense shaped aspect of the sulfide mineralization (5,6,7).

Las facies mineralizada masiva es formada de arsenopirita en cristales milimétricos, a veces fragmentados, cementados por clorita; contiene tambien una parte variable, del orden de 15%, de cuarzo y muscovitas detriticas. A la escala de unos cm se ve el cambio de cristales casi juntos con poca matrix a cristales aciculares dispersos en la matrix cuarzo filitica; la ley en arsenio baja de 30% hasta 17%. La parte basal de estas facies presentan lentes de unos cm de esquistos cloritosos donde los cristales de arsenopirita se disponen en finas laminaciones (fig. 9).

Las facies mineralizada del piso está constituida principalmente de pirrotita y pirita con trazas de calcopirita. Presenta variaciones tanto en el sentido vertical como según el rumbo, con repartición y proporción diferente de los sulfuros; en la base abundan los esquistos negros ricos en pirrotita diseminada que pasan hacia arriba a esquistos cloritosos. Fragmentos de esquistos bordados

de laminaciones finas de pirrotita dan el aspecto de brechas de retrabajo sedimentario (fig. 10) La pirrotita, aun cuando forma playas de gran longitud, guarda un aspecto de granos de unas 400 micras; puede rodear el cuarzo y las filitas. A veces cristales de arsenopirita de gran tamaño envuelven a la pirrotita.

Fig. 9 : Facies mineralizada masiva: cristales milimétricos de arsenopirita dispersos en una matriz cuarzo sericita.

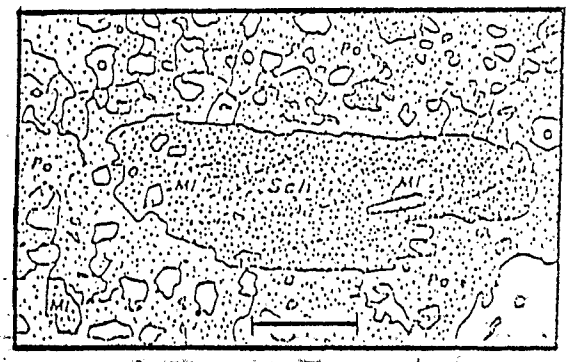


Fig. 10 : Facies mineralizadas piso : fragmento de shale dentro playa de pirrotita policristalina con relicas de cuarzo.

Las facies mineralizada del techo, así como la del piso está caracterizada por la abundancia de la pirrotita, pero se nota que hay más arsenopirita. el paso a los esquistos encajonanates se hace mediante un nivel de unos 2 m. de areniscas finas con pirrotitas y piritas diseminadas. La abundancia de los sulfuros disminuye rápidamente hacia arriba.

Una intensa alteración afecta localmente a la roca encajonanate en el piso. La capa de cuarcita esta recortada por numerosas vetillas de cuarzo formando un stockwerk; pueden formar bolsones de cuarzo gris azulado (parecido al de los mantos) con clorita y sulfuros. Esta modificación puede llegar a cambiar totalmente la roca original, transformándola en cuarzo, clorita, arsenopirita y pirrotita. Estas facies se interpretan como los testigos de zonas de fuentes (feeder) de las circulaciones hidrotermales.

En toda la unidad cabalgante se nota la presencia, con una densidad variable, de vetillas con cuarzo, clorita, pirrotita, pirita y arsenopirita; al borde de ciertas vetillas, cristales de arsenopirita pueden llegar hasta 1 cm. La influencia de la naturaleza mas arenosa (es decir más permeable) o mas pelitica de las capitas sedimentarias recortadas , se notan en el aumento de la potencia que muestran estas vetillas, la abundancia de los sulfuros y su desarrollo lateral más importante.

IV DATOS GEOQUIMICOS.

La geoquímica de la zona a sido enfocada mediante el análisis de unas 180 muestras representativas de las diferentes facies con el propósito de evidenciar variaciones en las leyes de los elementos mayores y trazas y de relacionarlos con los cambios observados en la mineralogía.

124 de las muestras corresponden a las facies del criadero de sulfuros y de la serie encajonanate (las demas corresponden a muestras de los mantos de otros tipos de cuarzo, de leucogranitos, rocas volcánicas, etc. incluidas por comparación).

Los análisis se han hecho por IPC en modo secuencial automatizado (35 elementos). El oro por absorción atómica, el asufre por horno de inducción. Tambien se han usado varios métodos particulares para complementar los datos segun los elementos (químico por fluor y cloro, colorimetria para W y Sn) fire assay para oro, activación neutronica, etc). El mayor problema encontrado, particularmente con el oro es el denominado "efecto de pepa" que influye sobre la representatividad de los análisis.

Los datos estan presentados en forma resumida en la tabla Nº1; se han reunido según determinación de campo en varios grupos siendo los principales: -Las pizarras encajonantes (con 38 nuestras promediadas) dándose también el análisis de una muestra "representativa" (Po 198) con el propósito de definir las caracteristicas del fondo geoquímico general de la serie encajonante. Las areniscas en el piso, cerca de la mineralización. -Las facies de la zona de intensa alteración en el piso. -Las facies mineralizada del piso. -Las facies mineralizada central. -Las facies mineralizada del techo. -Las facies caja (shales) en el techo.

De estos datos salen a la vista unos rasgos principales son:

Factores de concentración diferentes aparecen en las facies mineralizadas, según los elementos. Tomando como base de comparación el grupo de los esquistos encajonantes, se nota que:

Ciertos disminuyen (por ejemplo Si, Al, B, Ba,) (fig. 11); otros no varian o aumentan en poca proporcion (li, Zr, Y,), otros se incrementan aumentados en factor de x6 a x10 (fe, Mg, Mn, P, V, Sr,), otros se incrementan como a, Pb, As, S, Sb, Ag, Au, W,... (son los elementos metálicos de la mineralización, (fig. 12). (Alguno elementos tales Bi, Mo no han sido encontrados al nivel de mas de ppm).

Una fuerte variabilidad de leyes existe por ciertos elementos en las muestras de una misma facies. El examen de las muestras permite generalmente explicar esta dispersión por una heterogeneidad debida, por ejemplo a la presencia de sulfuros diseminados o de vetillas de cuarzo, etc. Asi que si quiere estimar en forma correcta las variaciones se debe referir a una sola (o un número reducido de) muestras representativas por cada tipo de facies y no a promedios. Este hecho se comprueba nitidamente en el caso del arsenio: solo un número reducido de muestras de los esquistos encajonanates tiene leyes inferiores a 5 ppm. También, considerando el asunto al reves, aparece el papel indicador o guia indirecto que puede desempeñar el arsenio, una prospección geoquímica.

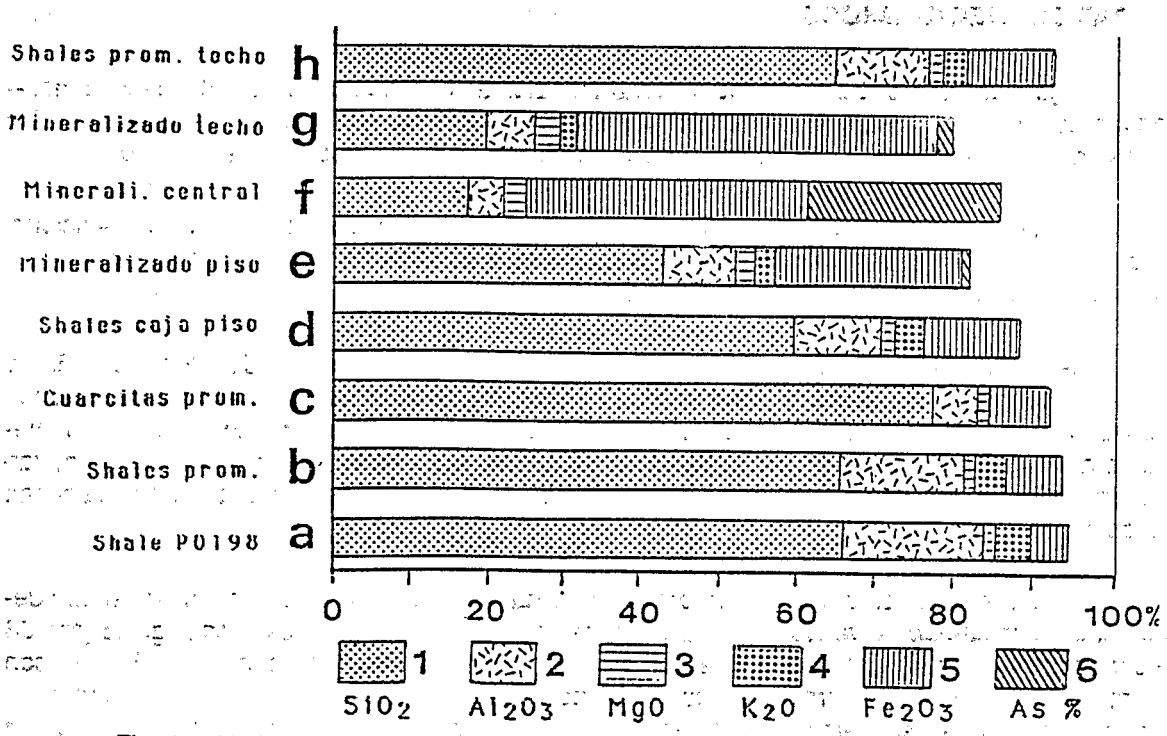


Fig. 11 : Variación de alguanos elementos mayores.
Fig. 11: Variation factors of some major elementos.

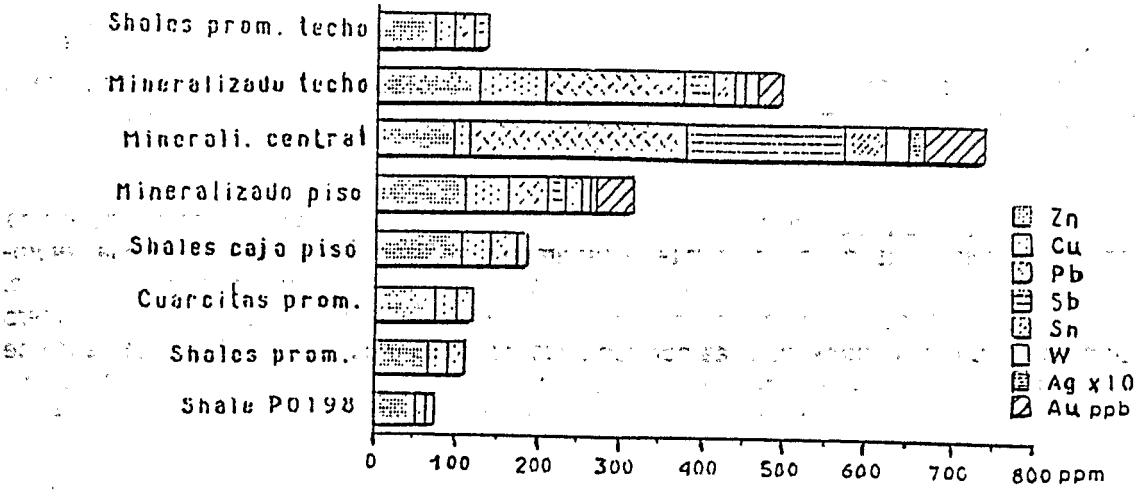


Fig. 12 : Variación de aglunos elementos metalicos
Fig. 12 : Variation factors of some metallic elements

Tableau I
Compositions chimiques globales
Average chemical compositions

COMPOSICIONES QUIMICAS PROMEDIAS

	a	b	c	d	e	f	g	h
	SCHISTE (éch. Po.198) analyse représentative	SCHISTES ENCAISS. (38 éch.) moyenne ± σ	QUARTZITES DU MUR (18 éch.) moyenne ± σ	SCHISTES DU MUR (18 éch.) moyenne ± σ	GRIFFON SILICEUX (5 éch.) moyenne ± σ	MINERAL. MUR (16 éch.) moyenne ± σ	MINERAL. MASSIF (9 éch.) moyenne ± σ	MINERAL. TOIT (10 éch.) moyenne ± σ	SCHISTES DU TOIT (8 éch.) moyenne ± σ
SiO_2 (%)	65,7	65,4 ± 3,9	77,1 ± 4	59,5 ± 4,2	81,6 ± 4,7	43 ± 10	17 ± 14	19,6 ± 5	64,2 ± 6,2
TiO_2	1,20	1,14 ± 0,18	0,9 ± 0,5	1,40 ± 0,43	0,26 ± 0,25	0,93 ± 0,32	0,43 ± 0,35	0,38 ± 0,14	0,99 ± 0,15
Al_2O_3	18,5	16 ± 3,6	6 ± 1,4	11,5 ± 5,9	3,4 ± 1,3	9 ± 3	5,3 ± 2,4	6,8 ± 1,2	12,5 ± 2
Fe_2O_3	4,5	6,5 ± 2,7	7,9 ± 2,4	12,5 ± 5,5	6,7 ± 1,8	24,4 ± 7	36,1 ± 7,9	46,6 ± 7	11 ± 5,8
MgO	1,3	1,5 ± 0,5	1,24 ± 0,8	1,7 ± 0,5	1,2 ± 0,2	2,5 ± 0,5	2,3 ± 0,8	3,1 ± 0,2	1,5 ± 0,7
MnO	0,05	0,04 ± 0,02	0,09 ± 0,06	0,13 ± 0,07	0,08 ± 0,02	0,23 ± 0,06	0,19 ± 0,08	0,25 ± 0,02	0,14 ± 0,08
CaO	0,7	0,57 ± 0,37	≤0,5	≤0,5	1,6 ± 0,6	2,2 ± 1,1	2,3 ± 1,8	3,9 ± 0,9	≤0,5
K_2O	4,6	4 ± 1,4	≤0,5	3,4 ± 2,7	≤0,5	2,4 ± 1,2	≤0,5	1,8 ± 0,6	3,1 ± 0,9
Na_2O (1)	0,8	1,21 (9 é.)	≤0,5	(1é = 0,8)	≤0,5	≤0.1	≤0,1	≤0.5	≤0,5
P_2O_5	0,08	0,08 ± 0,03	0,06 ±0,11	0,17 ± 0,32	0,01	0,7 ± 0,4	0,83 ± 0,66	1,38 ± 0,36	0,05 ± 0,50
Total (2)	97,43	[90]	[93]	[87]	[93,16]	[85,4]	[64,45]	[83,8]	[93,43]
S (3)	n.d.	n.d	n.d.	(1é = 6,2)	n.d.	8,4 ± 2 (4 é)	12,9 ± 3 (7 é)	18 ± 2	n.d.
Zn (ppm)	51	67 ± 27	75 ± 60	106 ± 134	42 ± 8	108 ± 32	94 ± 37	127 ± 10	70 ± 30
Cu	14	24 ±14	26 ± 11	36 ± 20	17 ± 2	55 ± 20	22 ± 11	82 ± 18	24 ± 7
Pb	10	20 ±18	20 ± 19	34 ± 23	21 ± 15	50 ± 47	252 ± 219	65 ± 80	25 ± 10
As	≤5	463 ± 653	1214 ± 1884	7923 ± 2424	2860 ± 4562	7923 ± 8878	21% (30% - 0,1%)	19500 ± 16000	517 ± 1094
Sb	≤10	≤10	12 ± 10	12 ± 3	24 ± 10	21 ± 12	193 ± 60	37 ± 18	17 ± 3
Sn	≤5	≤5	≤5 (2 é=18)	≤5 (3 é=15)	12 ± 4	20 ± 8	50 ± 20	28 ± 8	≤0,5
Ag	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1 (1é=0.6)	≤0,1	0,66 (7 é)	1,4 ± 1,2	1,37 ± 0,58	1,4 ± 1,2
W	≤10	≤5	≤5 (3 é=20)	≤5 (4 é=20)	≤5	14 ± 7 (14 é)	30 ± 10	13 (3 é)	119 ± 57
V	121	104 ± 22	84 ± 41	243 ± 80	74 ± 38	402 ± 140	355 ± 123	607 ± 105	355 ± 123
Ba	635	558 ± 255	96 ± 85	433 ± 426	≤10	240 ± 131	- 20	<20	538 ± 177
Y	42	40 ± 8	29 ± 10	50 ± 33	≤20	80 ± 30	65 ± 44	114 ± 42	26 ± 9
Zr	205	257 ± 88	334 ± 154	498 ± 250	99 ± 105	325 ± 135	452 ± 131	425 ± 252	235 ± 57
Nb	35	33 ± 5	21 ± 7	42 ± 9	13 ± 5	48 ± 9	37 ± 14	54 ± 6	30 ± 6
La	38	37 ± 15	16 ± 12	44 ± 19	≤20	45 ± 13	33 ± 14	47 ± 15	24 ± 7
Ce	108	98 ± 39	71 ± 23	135 ± 43	≤20	48 ±9	106 ± 45	106 ± 46	159 ± 40
Li	75	66 ± 29	36 ± 20	61 ± 20	23 ± 10	94 ±24	78 ± 47	115 ± 12	69 ± 31
B	135	137 ± 52	78 ± 28	98 ± 80	63 ± 15	48 ±42	≤10	12 ± 7	109 ± 24
Au ppb	≤10	≤10 1é = 25	≤10 7 é = 80 (25/315)	≤10 4 é = 30 (25/40)	463 ± 596 (1500/40)	45 (55/25) 12 é = ≤10	74 (150/25) 3 é = ≤10	30 (35/25) (5 é ≤10)	≤10

a: shale tipo Po198, b: shales promedio de 38 muestras, c: cuarcitas piso promedio de 18 muestras, d: shales piso, promedio de 18 muestras, e: mineralizado piso, prom. 16 muestras, f: mineralizado central, prom. 9 muestras, g: mineralizado techo, proedio de 10 muestras, h shales del techo, promedio de 8 muestras.

(1) Na_2O par A.A. à l'ORSTOM-Bondy. (2) [ ] = total sur des moyennes (3) soufre total, four à induction ORSTOM-Bondy Autres éléments par ICP au BRGM, sauf Au par A A. au BRGM. Non figurés : Mo, Bi : toujours inférieur à 10 ppm/Présents à faible teneur (proches du seuil et sans variation significative) Be (2-10 ppm), Cd (> 2 à 5 ppm), Co 5-20 ppm Ni = 37 ± 7 et Cr = 75 ± 13 dans les schistes encaissants, non représentatif à cause de pollution au broyage pour les autres faciès
n d = non déterminé é = échantillon

(1) by A A. ORSTOM-Bondy. (2) [ ] = total of average. (3) by ignition furnace. Other elements : by ICP and Au by A A at BRGM Mo, Bi less than 10 ppm Allays low : Be (2-10 ppm), Cd (<2-5), Co (5-20) Ni = 37 ± 7, Cr = 75 ± 13 in the host shales, no significant in other facies because grinding polution
n d = not analysed é = sample

Interpretación: hemos visto que la serie encajonanate se caracteriza por una granulometria fina, con poco litoclasto,s lo que permite discutir el significado de estas rocas detritícas en cuanto a su relación con minerales principales tales cuarzo, feldespatos, filitas y carbonatos y tratar de establecer una relación mineralogia-geoquímica. Sabemos, además, que la serie no contiene rocas con carbonatos libres; así que si excluimos los niveles volcano-sedimentarios, la serie se reduce a la asociación de areniscas o arenitas líticas y de shales. Este hecho se ilustra en diagramas binarios, por ejemplo SiO2 vs AL2O3, con una correlación negativa (fig. 13).

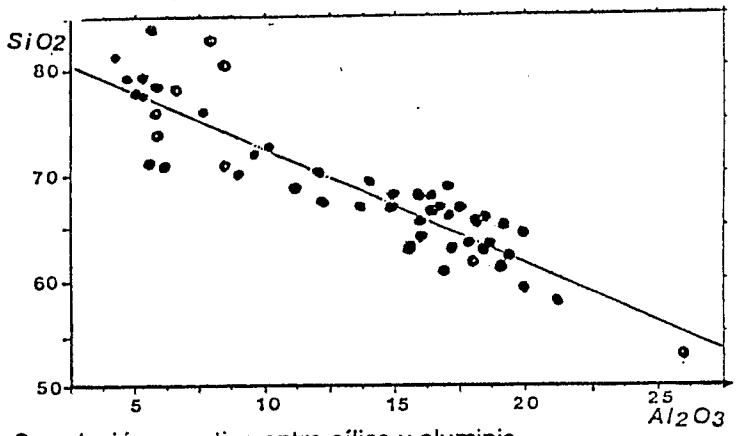


Fig.13 : Correlación negativa entre sílice y aluminio.

El diagrama Al2O3 vs K2O muestra una correlación positiva con una pendiente de 0.3, que es muy cercana al radio de estos elementos dentro de la Illita. El mismo tipo de diagrama se obtiene con el Ba, V, etc, indicando que estos elementos son constituyentes de las arcillas o micas tipo illita.

Con el diagrama de "saturación del aluminio, donde se considera Na y K en forma de equivalente atómico, se nota que las muestras estan muy lejos del campo de las grauvacas o de las arcosas (fig. 14) confirmando así la casi ausencia de feldespatos y el caracter muy maduro de la sedimentación.

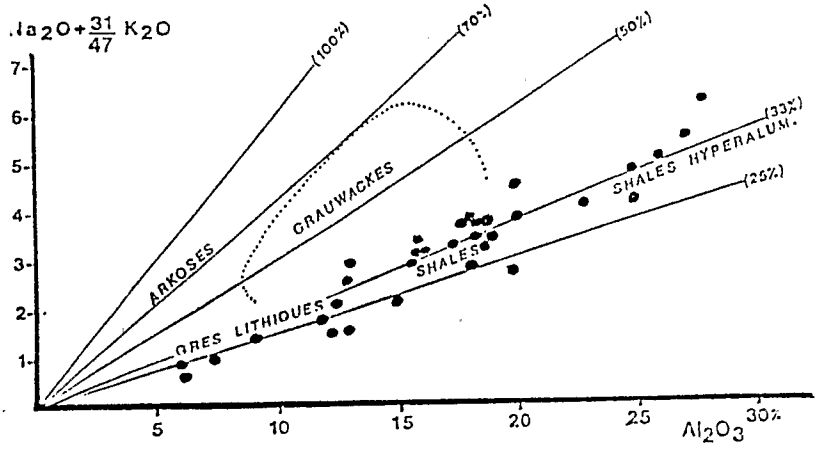


Fig. 14: Diagrama de saturación del aluminio.

Así que podemos definir la serie encajonante en primera aproximación, como una mezcla entre dos polos (endmembers), uno de cuarcita (con 80 % de silice) y otro de pelita (=mezcla illita-muscovita con poco cuarzo), tal como se muestra por la posición de las muestras en el diagrama de Al/Si vs K2O por ejemplo (Fig. 15)

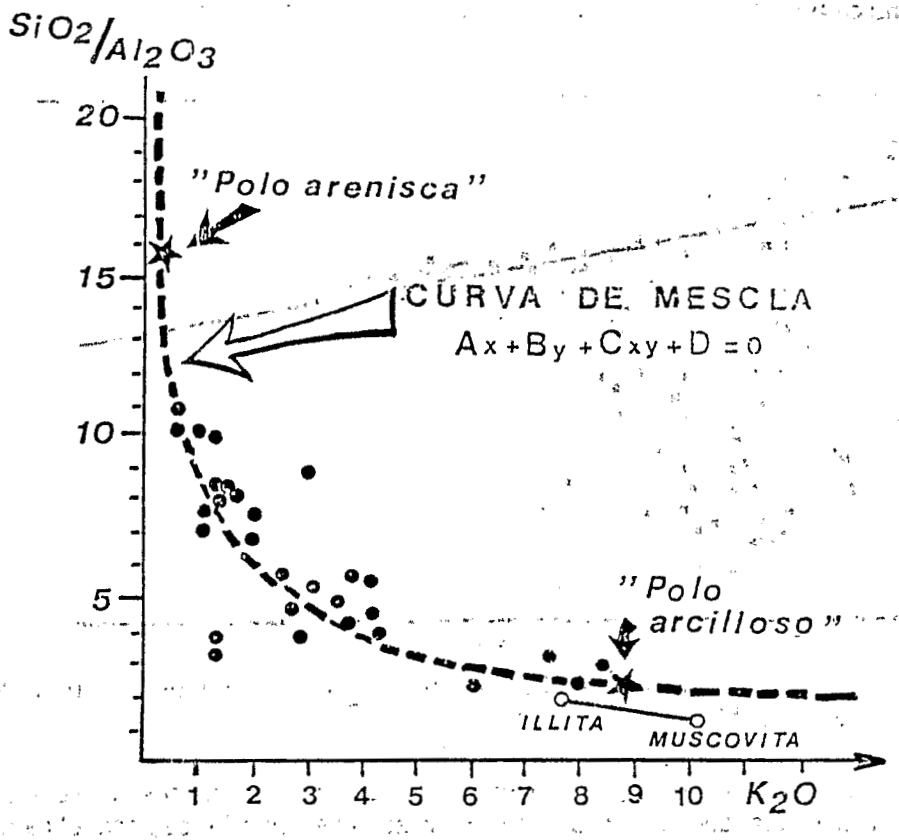


Fig. 15 : Posición de las muestras de rocas encajonantes entre 2 polos.

Si algunos elementos químicos se relacionan directamente con minerales (por ejemplo Na en el plagioclasa, Fe, Ti, Mn en las filitas) otros pueden ir en varios minerales diferentes: Asi Ca pude ir en las plagioclasas y carbonatos, K pueden entrar en las filitas y el feldespato potásico, asi que una discusión más completa, y mucho más larga seria necesaria para caracterizar mejor esta serie encajonate; el propósito de esta exposición es nada más que indicar el procedimiento. En este modelo de 2 polos no se toman en cuenta ciertos elementos tales el como el circon, las tierras raras, etc., su comportamiento es casi indiferente, con una leve correlación con SiO2; eso se explica el hecho que tales elementos son concentrados en minerales pesados (circon, monazita, etc.) que logran concentrarse en láminas de base de bancos donde generalmente, las condiciones hidrodinámicas han "lavado" las filitas más livianas.

La parte hidrotermal se caracteriza por el aporte de elementos tales como As, (que llega hasta 30 %), S y Fe así que otros elementos metálicos particularmente Pb, Sb, Sn, W, Ag, Au, Zn, una parte del cobre etc., y tambiaén elementos no metálicos tales como Ca y P que con fluor forman apatita hidrotermal.

En los diagramas binarios, por ejemplo SiO2 vs Al2O3, (fig. 16) se nota que las facies mineralizadas se apartan más y más del trend definido por la serie encajonate. Se van hacia el punto de origen de las coordenadas, ya que por causa de aporte y mezcla de fierro, azufre, etc., los dos elementos de referencias tienen que disminuir. De la misma forma las muestras "traidas" hacia arriba

por encima del trend corresponden a silicificación, tal como ocurre por ejemplo con ciertas facies de grifon (feeder).

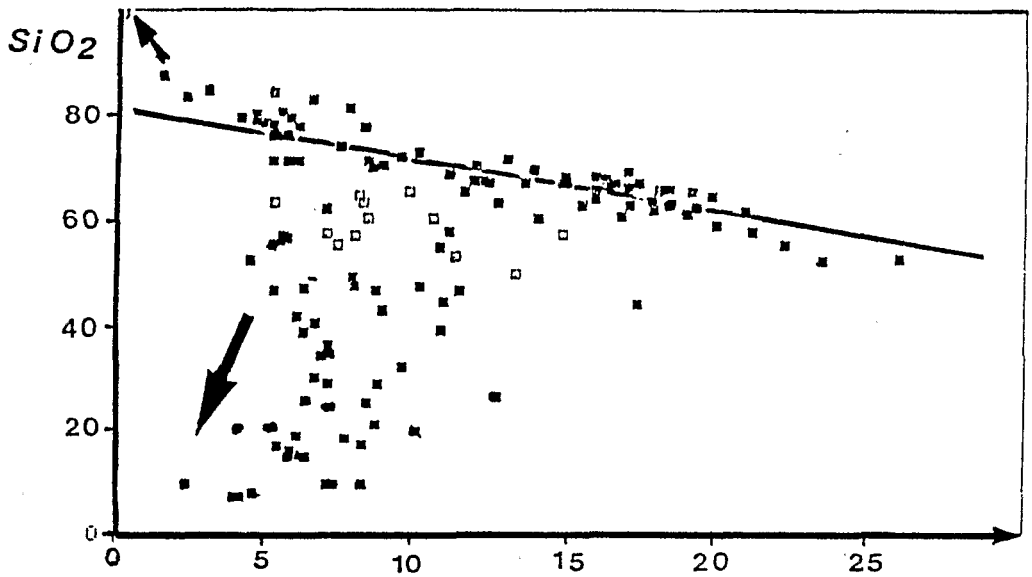


Fig.16: Posición de las muestras mineralizadas en relación con las muestras de la serie encajonate (cf de linea de la fig. 13).

Las facies del grifón se caracterizan por el aporte de Fe, Si y sulfuros. hemos visto que el oro es muy puro; pero hay que notar que solo en las facies de la zona del grifon se dectecta el mercurio en forma importante.

Cuando se calculan los coeficientes de mutua correlación entre todos los elementos de todos los análisis, se vé que el oro está fuertemente relacionado con el plomo, siendo su correlación con los demas elementos metálicos y el arsenio más debil. El aporte hidrotermal se expresa ya sea bajo forma sulfurada o bajo forma silicea (grifón y mantos) pero, aún en las facies de cuarzo, la fuerte correlasión Au - Pb sigue siendo la misma.

Sulfuros

El análisis de la composición de los sulfuros nos da información sobre las condiciones físico-químicas de su cristalización.

La composición de las arsenopiritas se ha determinado por microsonda. Se ha podido usar la composición de 77 arsenopiritas, tomando en cuenta que solo se usan análisis donde el contenido en fierro es cerca de la estequiometría (33,3 at%) y cuyo total en un peso % esta comprendido entre 98 a 100,5 %; ademas se ha comprobado que los elementos menores, en particular Co y Ni están bajos.

Si se presenta en un diagrama los datos en función del contenido de As y S se observa una variación del contenido en arsenico desde 30,5 at % hasta 33,5 at%. Pocos de los cristales muestran zonación y no hay variaciones fuertes entre borde y centro de los individuos.

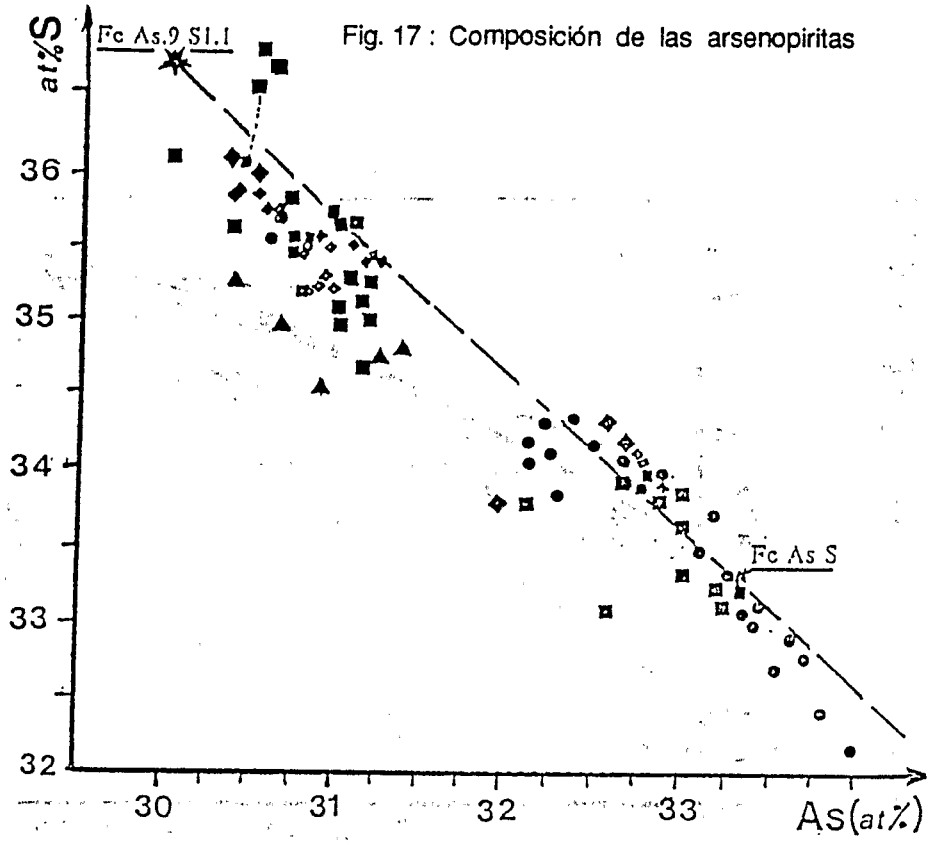


Fig. 17 : Composición de las arsenopiritas

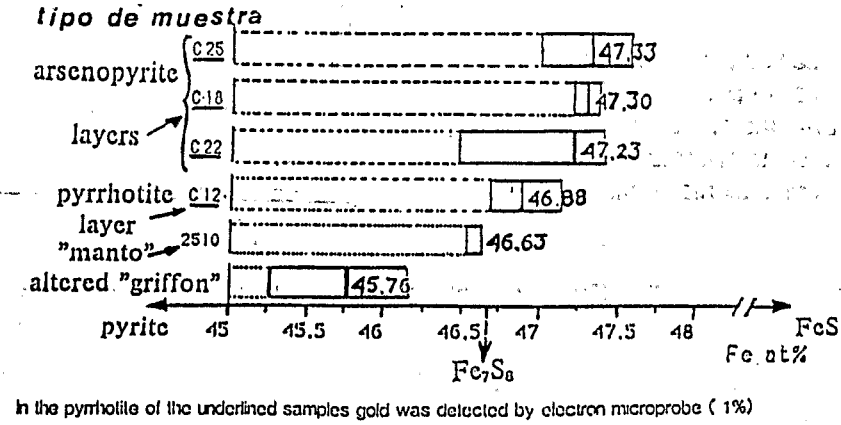
Composition of arsenopyrites associate with gold.
(lower sulfur contains correspond to quartz vein samples)

Se nota una cierta variación según las facies, siendo las arsenopiritas de los mantos las más pobres en azufre pero sin que haya estadisticamente dos grupos diferentes; no se distinguen los datos de criaderos de sulfuros de los mantos y vetas.

El análisis de la composición de las pirrotitas del criadero (fig. 18) indica un aumento de actividad de asufre o una baja de la temperatura.

Fig. 18 : Contenido en hierro de las pirrotitas.

Tambien se ha buscado la presencia de oro "invisible" incluído dentro los sulfuros. (Las muestras en las cuales se detecto trazas de oro están subrrayadas).



In the pyrrhotite of the underlined samples gold was detected by electron microprobe (1%)

Estas leyes en Au estan cerca del límite de detección de la sonda, aún con programa especial de medición de larga duración pero que son confirmados por análisis por activación neutronica (fracciones separadas de arsenopiritas hasta 22g/t de Au).

Bajo ciertas limitaciones teóricas se puede usar la composición de las arsenopiritas, y los demás sulfuros de hierro para evaluar las condiciones de temperatura en mas o menos 400°C.

La ausencia de magnetita, o llölingita indica condiciones de fuerte actividad de fugacidad de asufre fS2.

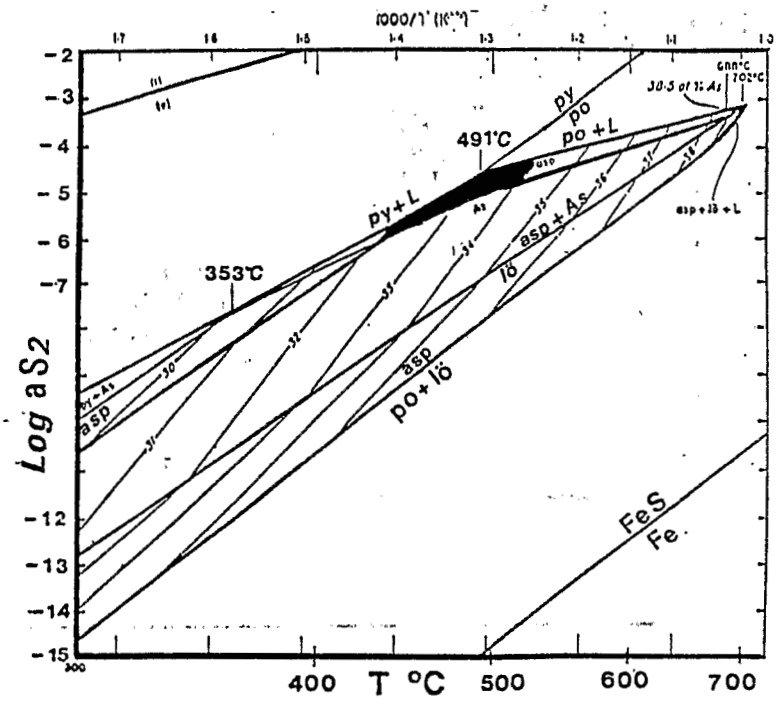


Fig. 19 : Condiciones de T° y a S2 de la mineralización de la Rinconada.

Así las condiciones de deposición son de alta temperatura con fuertes variaciones de actividad de asufre y una presion estimada del orden de 2 kb (basado en 2000 m de agua).

Datos sobre la solubilidad del oro en soluciones saturadas en silice muestran una baja de la solubilidad del oro entre 500 y 400°C. Por la inflección de la curva.

La flecha marca el área de mayor deposición del oro con una indicación aproximativa de temperatura dada por el límite clorita/biotita.

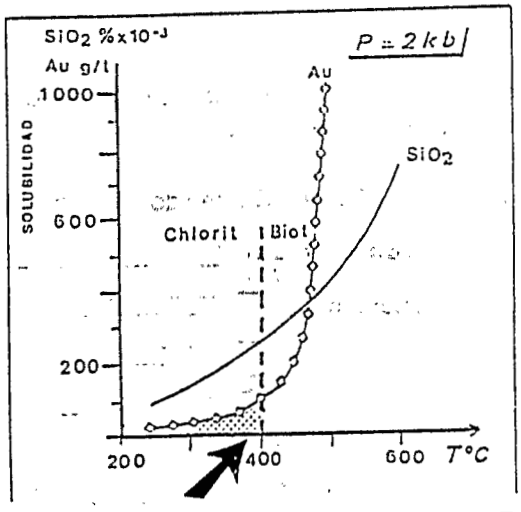
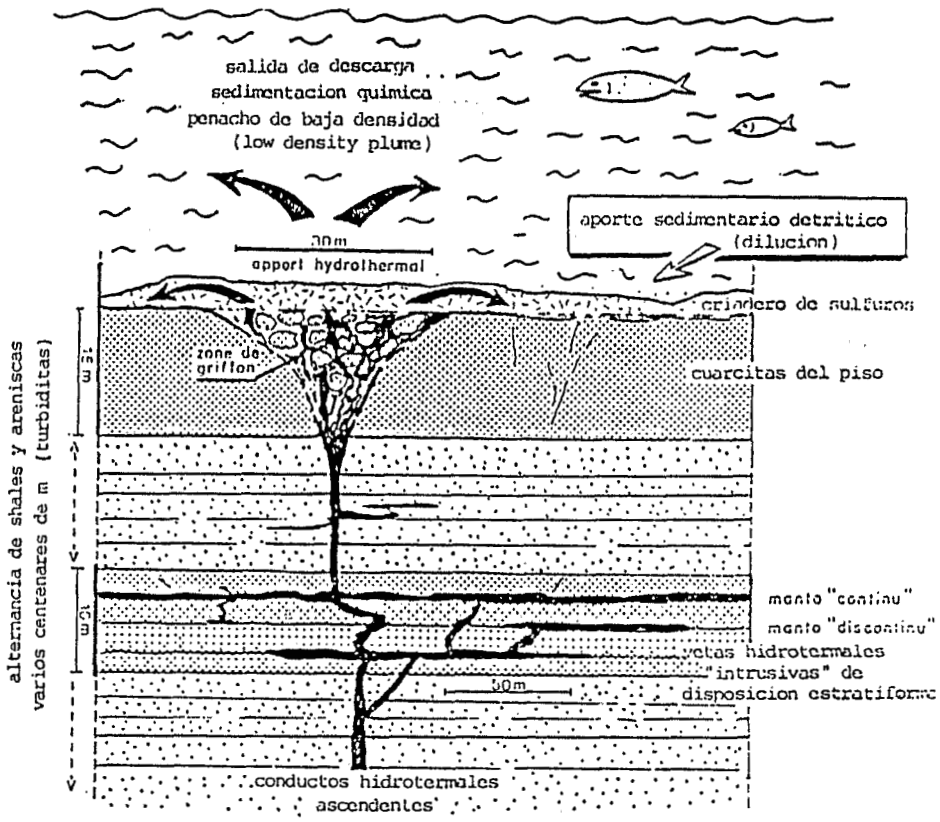


Fig. 20 : (Datos de solubilidad: Au = Henley, 1973, Si = Weill & Fyte, 1964).

V. CONCLUSION.

Podemos encarar un modelo que nos ayude a explicar la genesis de las mineralizaciones.

El proceso empieza con la concentración de lodos sulfurados ricos en metales, en las zonas profundas mientras se sedimenta la formación detrítica de Ananea. Estos lodos estan brotando de grifones hidrotermales submarinos, que no corresponden a una sola fuente bien individualizada, sino mas bien, a varias grietas o conductos de salida.



MODELO INTERPRETATIVO DE LAS MINERALIZACIONES
posicion de los mantos y del criadero (amas) de sulfuros

Los flujos hidrotermales ascendentes fluyen a través de la columna sedimentaria en proceso de compacción, donde ciertos límites de capas sirven de drenaje, permitiendo así la formación de mantos y la impregnación de algunos niveles sedimentarios.

Existian fuertes gradientes de temperatura pero no hubo fenómenos de ebulición. Datos faltan para precisar si las soluciones incorporaban aguas superficiales recalentadas e incluidas en un sistema convectivo o si se trataba de aportes juveniles.

Observaciones recientes en zonas de rifting por ejemplo en el Mar Rojo como en varios sitios de la Mid-Ocean Ridge han mostrado como funcionan actualmente fuentes hidrotermales, que permiten entender tambien como estos fenómenos han podido actuar en el pasado por mineralizaciones más antiguas.

El mismo origen hidrotermal puede entonces atribuirse a todos los fenómenos observados, ya sea vetillas de cuarzo secantes, y mantos mas o menos extensos y contínuos, alteracion local en las cuarcitas en el piso, y el mismo criadero de sulfuros.

Este hecho, junto con la detección de oro en las pirrotitas y en las arenopiritas con leyes de

hasta 100 ppm, pueden conducir a un modelo donde el oro fino (invisible, precoce) está introducido en la serie, en parte en los sulfuros y quizas también en el gel de la silice hidrotermal (silice coloidal) y luego da el oro visible que está remobilisado y trampado en los mantos que por fracturación hidrólica y mecánica constituyen una buena trampa.

Como ilustración final, este slide muestra una sección delgada de un manto de Bolivia (Yani) con estructura de presión tectónica afectando el cuarzo, que luego es recortado por vetillas con albita, y con oro en grandes playas tal como una clorita = ripidolita y piroxeno. Este oro tardio, de alta finesa, forma la actual mineralización económica.

Referencias:

FORNARI M., HERAIL G., LAUBACHER G.- El oro en la cordillera Oriental: el placer de San Antonio de Poto y sus relaciones con la mineralización primaria de la Rinconada, V° Congreso Latino Americano de Geologia, actas IV, p. 369 - 386. Buenos Aires, 1982.

FORNARI M., BONNEMAISON M.- Mantos et amas sulfo-arsénié á or de La Rinconada, premier indice de mineralisatíon de type exhalatif-sédimentaire dans la Cordillére Orientale du Pérou. Chronique. recherche. miniére., 474, p. 33-40, Paris 1984.

FORNARI M., HERAIL, G., LAUBACHER, G., DELAUNE, M.- Les gisements d'or des Andes sud-orientales du Pérou. Géodynamique, vol 3, n° 1-2, p. 139 - 161, Paris, 1988.

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

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS

REVISTA DE GEOCIENCIAS

La Paz, Octubre 1990 - Vol. 4 Nº1