

Mineralogía y génesis de las concentraciones metálicas de Co-(Ni-Cu) de la Mina de San Juan de Plan (Valle de Gistaín), en el Pirineo de Huesca

Por R. CASTROVIEJO BOLIBAR (*)

RESUMEN

Se trata de concentraciones irregulares, estrato-ligadas, de sulfuros, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-(Ni-Cu-Fe), relacionadas con un horizonte ankerítico intercalado en pizarras ampelíticas silúricas. La mena se compone esencialmente de cobaltina, eskutterudita, gersdorffita y pirita, con cantidades menores de glaucodoto, pararammelsbergita, alloclasita, calcopirita, bismutina y bismuto nativo y trazas de otros minerales (niquelina, rammelsbergita, tetraedrita, etc.). Como minerales descendentes, aparecen digenita, covellina, eritrina, annabergita, malaquita-azurita, limonita, etc., impregnando la ganga ankerítica o en eflorescencias superficiales. Los minerales primarios definen una paragénesis hidrotermal, del rango cata-mesotermal.

El estudio textural permite establecer la secuencia de cristalización de la mena, sometida a intensa cataclasis durante el ciclo alpino. Su origen se explica por secreción lateral de metales pre-concentrados en las pizarras silúricas, en relación con fluidos hidrotermales emanados de la granodiorita de Bielsa durante el ciclo hercínico y propagados a favor de fracturas E-O. Dichos fluidos son los que dan lugar, por reemplazamiento de niveles carbonatados sedimentarios, a la roca ankerítica en cuyo seno aparecen confinadas dichas menas.

Esta interpretación, apoyada por datos geológicos y químicos, permite establecer similitudes entre este yacimiento y los del tipo de Cobalt-Ontario, especialmente en lo que se refiere a la génesis, aunque existen marcadas diferencias con respecto a la entidad (mucho menor en el caso estudiado) y a la paragénesis (ausencia de Ag en San Juan de Plan). De dicha interpretación se desprende, asimismo, la potencial importancia del Sistema Silúrico como metalotecto para mineralizaciones de Co-(Ni-Cu).

ABSTRACT

The Co-(Ni-Cu-Fe) sulphide, arsenide and sulpharsenide ores occur in irregular concentrations, bound to an ankeritic horizon which is interlayered in Silurian graphitic slates belonging to the San Juan de Plan series of autochthonous Palaeozoic rocks (Spanish Central Pyrenees, Huesca Province). The principal ore minerals, occurring mainly disseminated or as small masses or fracture-fillings in the ankerite-(quartz-calcite) gangue, are cobaltite, skutterudite, gersdorffite, and pyrite; there are minor amounts of glaucodot, pararammelsbergite, alloclasite, chalcopyrite, bismuthinite, native bismuth and, rarely, niccolite, rammelsbergite, tetraedrite, etc. Supergene minerals like digenite, covellite, erythrite, annabergite, malachite-azurite, and limonite occur as impregnations or as stalactites and incrustations.

The main ore minerals define a hypogene cata-mesothermal paragenesis, whose origin is explained by lateral secretion from sin-sedimentary metal pre-concentrations in the Silurian black slates, during the Variscan orogeny. Late hydrothermal solutions emanating from the Bielsa granodiorite along E-W trending fractures are considered to be the main agents of this concentration, as well as the cause of the contemporaneous ankeritization of inter-layered carbonate horizons which produces the ankeritic ore horizon.

Intensive post-mineral, mainly alpine, tectonic activity produced local milonitization and ubiquitous cataclasis of the ores.

Detailed mineralogical and textural ore-microscopic observations, together with geological evidence and chemical data, support the here proposed genetic interpretation, which has certain similarities with the genetic model of the Cobalt (Ontario) deposits. Attention is drawn to the potential importance of the Silurian System in the region as a metalotect for metallic concentrations of this type.

(*) E. N. Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. Doctor Esquerdo, 138. 28007 Madrid.

INTRODUCCION

El presente trabajo ha sido realizado en ENADIMSA para el Programa Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales.

En la Mina San Carlos (~2 Km. al NE de San Juan de Plan, c. 1.725, figs. 1 y 2) se explotaron, durante los siglos XVIII, XIX y —esporádicamente— XX, unas concentraciones irregulares (pequeñas bolsadas y vetillas) de sulfuros, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-(Ni-Cu-Fe), ligadas a un horizonte ankerítico de unos 2 m. de potencia (brecha ankerítica), intercalado en pizarras ampelíticas silúricas.

Dicha mina consta de tres plantas y de una galería de desagüe, no siempre accesibles. Hay otros indicios similares, con labores de menor entidad, en su entorno.

La geología de todos estos indicios ha sido objeto de un reciente trabajo (CASTROVIEJO y NODAL, 1985), siendo objetivo del que ahora se presenta la interpretación genética de dichas concentraciones, partiendo de su estudio mineralógico y textural y contando con la información geológica aludida.

MALLADA (1881) describe el yacimiento, hablando de un «filón» del que se extraía un concentrado con leyes de 12 por 100 Co y 7 por 100 Ni. MALIVERNEY (1973) caracteriza el yacimiento como estratoide; según él, la mineralización, cuyo origen supone profundo y relacionado con la fracturación, «impregna, por una red de stockwerks, un nivel dolomítico sedimentario» y se compone esencialmente de pirita-skutterudita-bismutina-calcopirita-cuarzo-ankerita-calcita (como minerales primarios). Deja abierta la cuestión de la edad —paleozoica o post-triásica— de los episodios hidrotermales responsables de las mineralizaciones.

En el trabajo mencionado, CASTROVIEJO y NODAL (1985) describen una serie de indicios de brecha ankerítica alejados de la zona mineralizada y controlados por fracturas E-O subverticales, precisando su origen metasomático, por efecto de disoluciones hidrotermales, probablemente emanadas de la intrusión granodiorítica de Bielsa, como episodios póstumos de su consolidación magmática. Origen y control tectónico comunes con los de los citados cuerpos estratiformes de la Mina San Carlos y de su entorno, con la diferencia de que sólo éstos están mineralizados en Co. En este segundo

caso, se ha producido un reemplazamiento (ankeritización) de niveles calcáreos dolomitizados, interestratificados entre las pizarras silúricas integrantes de la serie de San Juan de Plan.

Estos procesos se sitúan en el marco de una historia geológica que, muy brevemente, se sintetiza a continuación, a partir del trabajo citado.

Tras la sedimentación del Paleozoico Autóctono y constitución de la actual serie de San Juan de Plan (Ordovícico a Devónico), sobreviene la Orogenia Hercínica, con sus sucesivas fases de plegamiento, el metamorfismo regional de bajo grado y el magmatismo, representado por intrusiones de granitoides. Entre éstos se cuenta la granodiorita de Bielsa, cuyo extremo —o apófisis— SE aflora, dentro del área estudiada, a lo largo del cauce del río Cinqueta.

El metamorfismo de contacto es manifiesto, aunque de intensidad moderada, en la serie de San Juan de Plan, que se ve transformada, en sus dos unidades inferiores, en corneanas con andalucita, cuarcitas y mármoles, aunque subsisten pizarras y calizas impuras. Sus efectos se manifiestan ya sólo débilmente en las pizarras ordovícicas y son prácticamente nulos en las unidades superiores a ésta.

Se originan —probablemente a causa de la intrusión— fracturas E-O, subverticales o buzando al Norte, en la serie de San Juan de Plan, las cuales facilitan el emplazamiento de diques, aproximadamente paralelos a dicha dirección, y el posterior ascenso de disoluciones hidrotermales.

Estas producen intensas alteraciones hidrotermales en las rocas circundantes, especialmente en los diques de pórfido, en los que dichas acciones son prácticamente ubicuas. Otro efecto de estas disoluciones es el metasomatismo ankerítico, que da lugar a la roca ankerítica y a relleno de vetas por ankerita filoniana. Este efecto puede constatarse esporádicamente en las litologías ordovícicas a lo largo de las fracturas E-O citadas (1-2 kilómetros) y especialmente en la mina y en su entorno, en el seno de las litologías silúricas (figuras 1 y 2).

Posteriormente, se produce movimiento según la familia de fallas E-O, hundiéndose el bloque S, y la consiguiente erosión del bloque N, donde la roca ankerítica y las mineralizaciones —al menos en la parte hoy aflorante— son eliminadas con

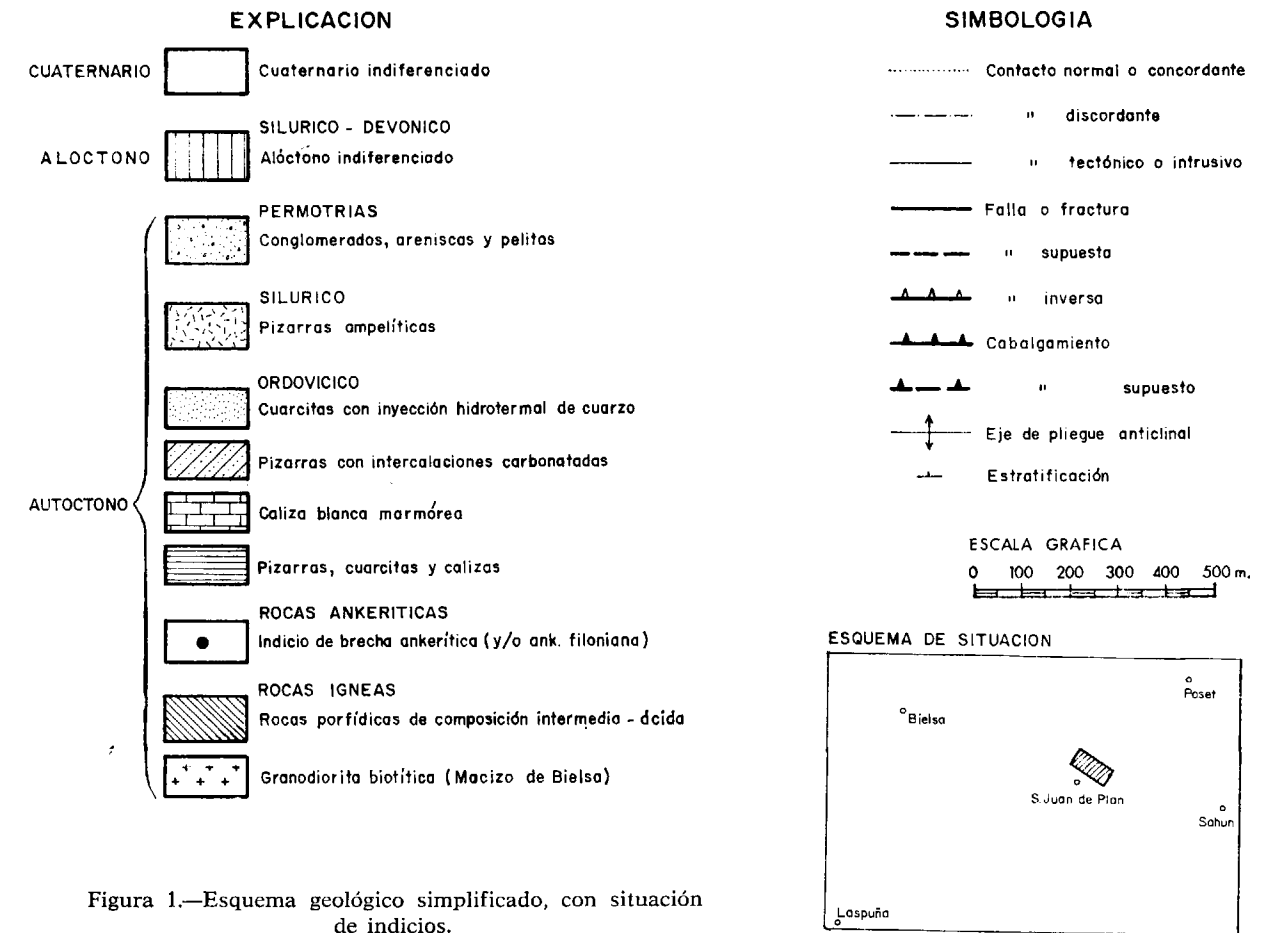
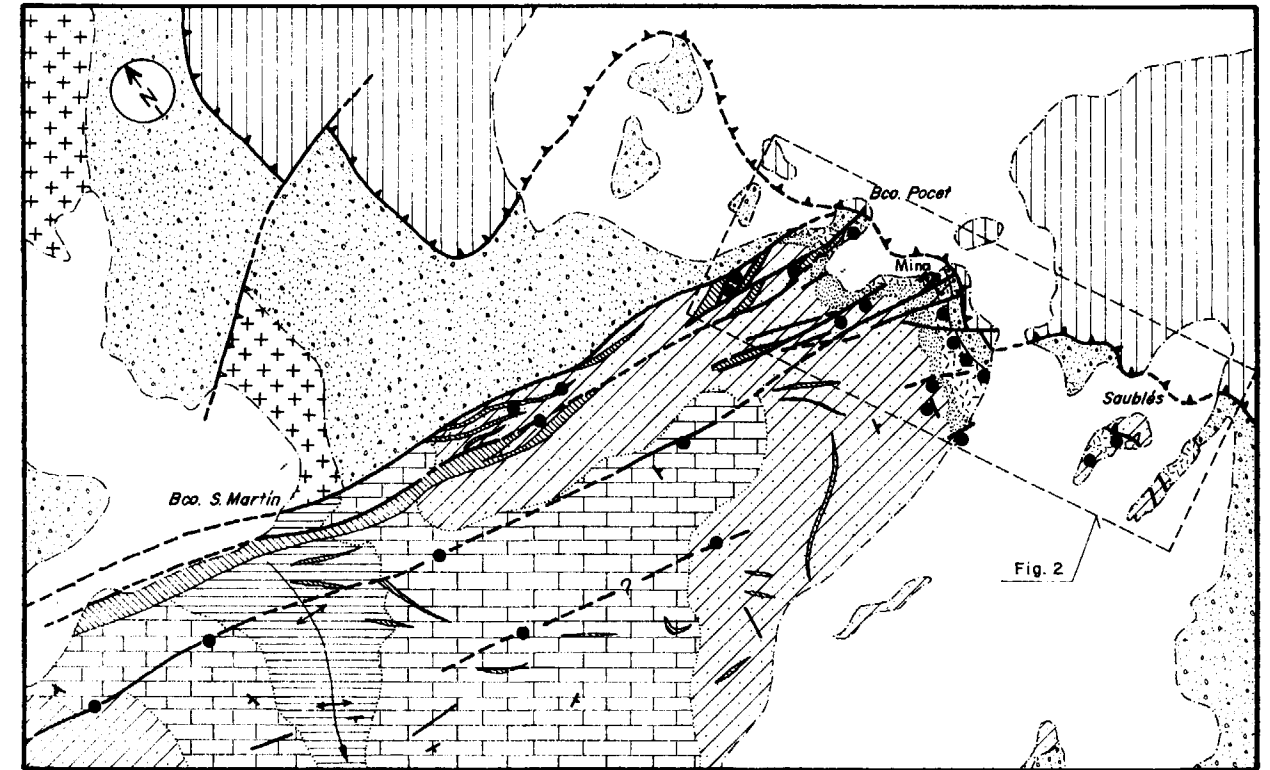


Figura 1.—Esquema geológico simplificado, con situación de indicios.

Referencia: M. T. N., escala 1:50.000 (Hoja 179 - Bielsa)

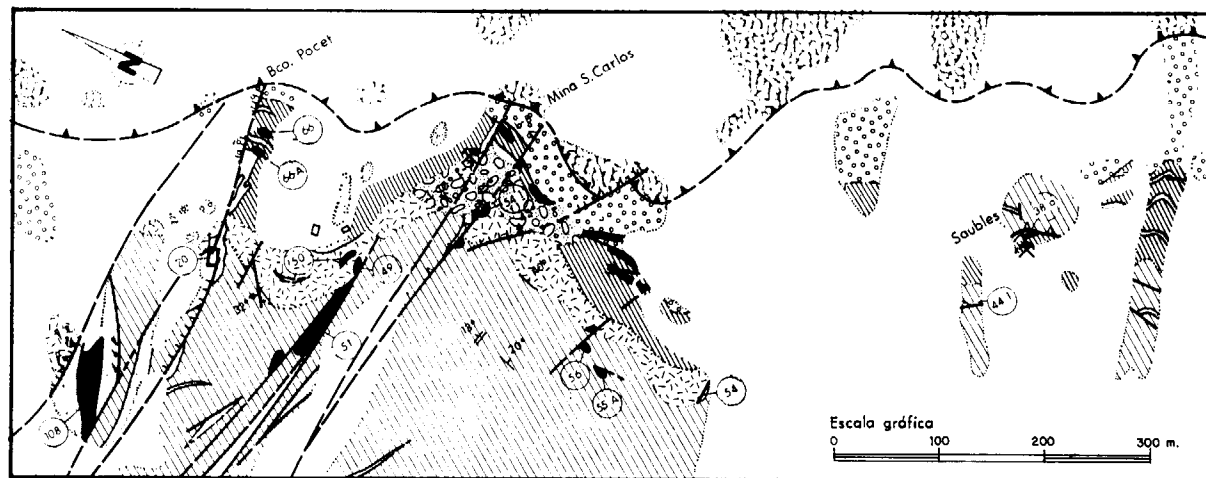
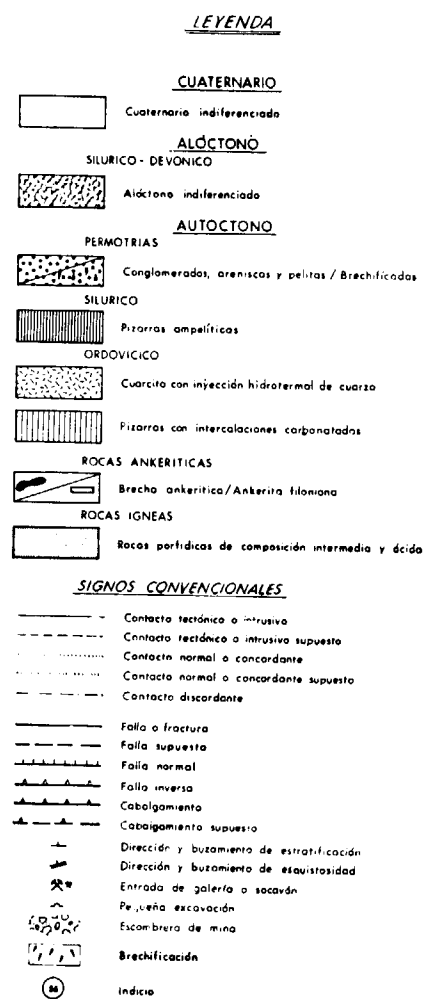


Figura 2.—Geología del área mineralizada (entorno de la Mina San Carlos; zona central, señalada en la figura 1).



toda la serie de San Juan de Plan, mientras que en el S quedan protegidas (pequeña fosa tectónica). El Triás se deposita en discordancia sobre el conjunto.

En el ciclo alpino, rejuegan dichas fallas en sentido contrario, elevándose el bloque Sur. El conjunto es truncado luego e intensamente trastornado por la tectónica de cabalgamiento alpina. Finalmente, las mineralizaciones son descubiertas por erosión en el bloque Sur, único en el que hoy aflora todavía la serie de San Juan de Plan.

MINERALOGIA. RELACIONES TEXTURALES

Las mineralizaciones se han caracterizado fundamentalmente mediante estudio microscópico con luz reflejada y, en la medida de lo necesario para esclarecer las relaciones con el encajante (brecha ankerítica), con luz transmitida.

Asimismo, se han realizado diversos difractogramas de rayos X y estudios de detalle con microsonda electrónica (*).

La roca ankerítica

Las mineralizaciones están ligadas al horizonte carbonatado aludido, compuesto por una roca an-

(*). C. VAQUERO (ENADIMSA) y M. FERNÁNDEZ (IGME), respectivamente.

kerítica silicificada y generalmente brechoide, bien caracterizada desde los puntos de vista petrográfico y mineralógico (CASTROVIEJO y NODAL, 1985). Macroscópicamente es una roca gris oscura a negra, recortada por innumerables vetas de color blanco. Está constituida básicamente por ankerita: una ankerita filoniana (blanca) y una ankerita metasomática de sustitución (gris, clastos). En conjunto se trata de una roca brechificada, venulada, completamente recrystalizada y posteriormente tectonizada.

Ankerita es el único componente esencial constante, pero localmente pueden aparecer cuarzo y menas de Co-Ni también como componentes esenciales. Cuarzo, calcita, sericita (muscovita) y materia orgánica (raramente grafitizada) son los accesorios más frecuentes, mientras que eritrina, limonita y otros minerales secundarios descendentes aparecen ocasionalmente, por meteorización de las menas correspondientes.

Interesa considerar el carácter de las relaciones texturales entre los minerales cobaltíferos, que constituyen la mena, y la ganga ankerítica. Casi siempre dichos minerales se presentan en la ganga ankerítica bajo alguna de estas tres formas: en bandas irregulares; en bolsadas o pequeñas acumulaciones; asociados a la fisuración (es decir, sellando una tenue red de microfracturas). En el primer caso, los intercrecimientos entre mena y ganga —figs. 3 y 4— sugieren que ambas clases de componentes han cristalizado en íntima asociación, con eventuales reemplazamientos (especialmente de ankerita por menas cobaltíferas). No se observan apenas texturas interpretables como de relleno hidrotermal.

Excepcionalmente, la mena se encuentra también asociada a superficies estilolíticas, con cuarzo, sericita y materia carbonosa. El estudio detallado de estructuras de este tipo se ha revelado como muy útil para la interpretación genética de ciertos yacimientos. Así, en el distrito de fluorita de Illinois (EE. UU.), AMSTUTZ y PARK (1967) establecen una secuencia de cristalización diagenética basada, en buena medida, en tales observaciones y una edad diagenética temprana, pre-estilolítica, para fluorita y esfalerita. Aunque las escasas posibilidades de observación hacen cuestionable cualquier conclusión, el caso del yacimiento ahora estudiado resulta bien diferente. La observación textural detallada, lejos de probar que los arse-

niuros y sulfoarseniuros de Co (cobaltina, glaucodoto, etc.) se han acumulado pasivamente en dichas estructuras, a partir de residuos pre-existentes insolubles (caso de la materia orgánica y productos arcillosos), sugiere más bien una génesis más reciente (post-estilolitización) de dichos minerales, que pueden crecer a expensas de la matriz ankerítica, en relación o no con superficies estilolíticas (figs. 5 y 6). El papel de éstas podría haber sido el de meras «trampas» ocasionales que, por su riqueza en materia orgánica, favorecen la precipitación de minerales metálicos, a partir de fluidos en circulación. Si se supone que los fenómenos de presión-disolución son diagenéticos, la mineralización sería post-diagenética y estaría relacionada con los procesos de ankeritización.

La mena

En primer lugar se exponen las características esenciales desde el punto de vista mineralógico-textural. Los componentes esenciales de la mena son cobaltina, eskutterudita —predomina esmalatina sobre cloantita— y gersdorffita, con piritita como acompañante casi ubicuo y pararammelsbergita, glaucodoto, alloclasita y calcopirita, relativamente frecuentes. Otros minerales, accesorios a escasos, cuya presencia es esporádica, son: linneita, bravoita, rammelsbergita, niquelina, bismutina, bismuto nativo, marcasita. Son frecuentes, además, los minerales titaníferos —rutilo, anatasa, leucóxeno, esfena—, la materia carbonosa (a veces grafitizada) y los minerales descendentes digenita-calcosina-covellina, secundarios de calcopirita, aparte de eritrina, annabergita, malaquita-azurita y limonita, derivadas de las menas de Co, Ni, Cu y Fe, respectivamente, en condiciones oxidantes. Finalmente, aparecen ocasionalmente, en trazas: tetrahedrita, pirrotina, magnetita (?) y plata (nativa o antimonial, ?).

Una característica general de las menas estudiadas —fig. 7— es su carácter brechoide, con frecuente cataclasis o incluso milonitización, afectando especialmente a los minerales más tempranos (pirita, cobaltina, eskutterudita, gersdorffita).

Otra característica es su irregularidad, tanto por lo que se refiere a la distribución espacial de dichas menas en el nivel mineralizado, como a los tipos de estructuras mineralizadas. Predominan concentraciones erráticas en pequeñas bolsadas,

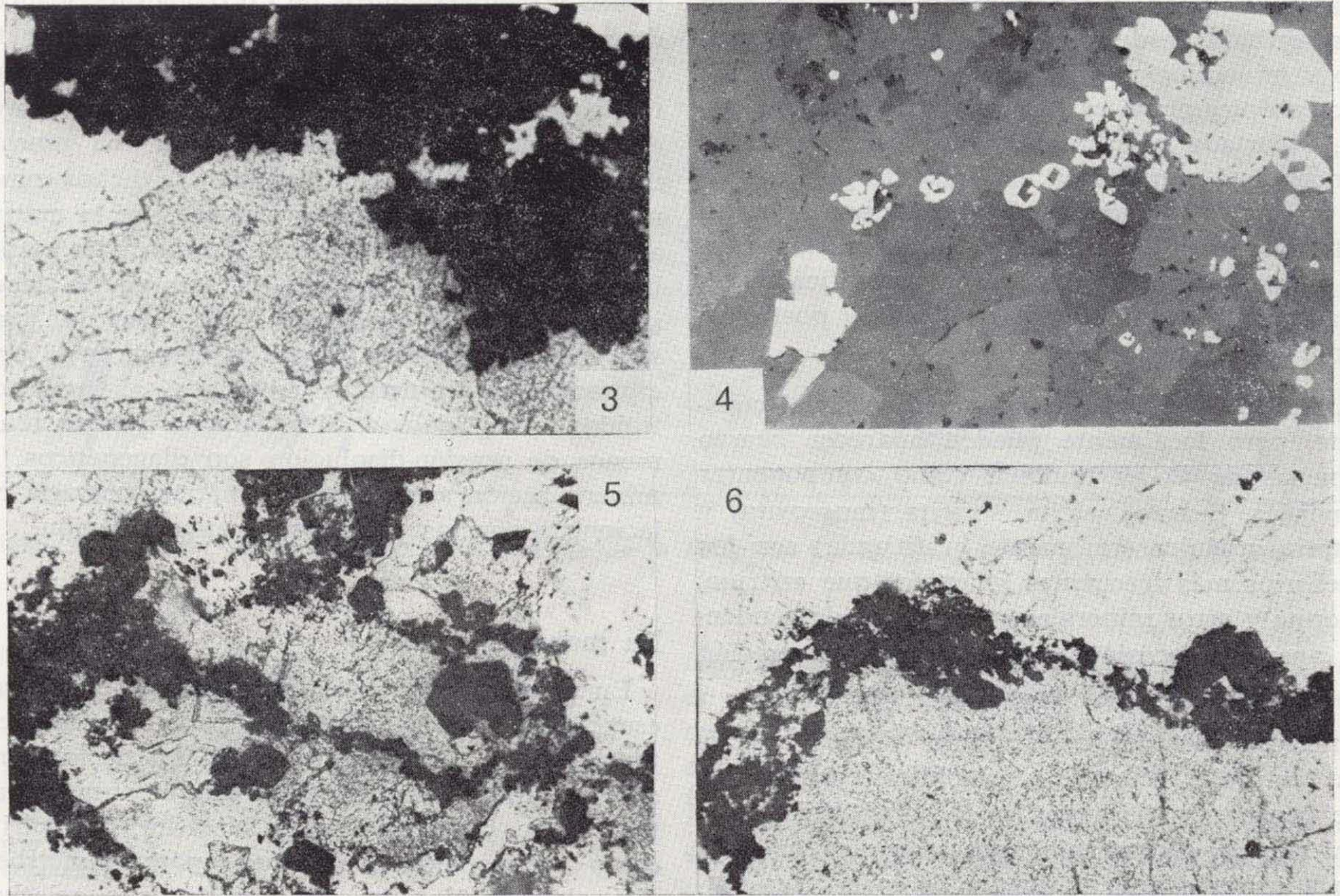


Figura 3.—Brecha ankerítica (gris), con banda mineralizada (esencialmente cobaltina y glaucodoto, negros): detalle del borde de la banda, con intercrecimientos entre mena y ganga y reemplazamiento incipiente de ankerita por cobaltina. Muestra de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz transmitida, N//, 90X.

Figura 4.—Intercrecimientos entre cobaltina (blanca) y ankerita (gris): rombohedros de ankerita revestidos por cobaltina a su vez englobada en masa ankerítica. Muestra de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 143X.

Figura 5.—Fotomicrografía de brecha ankerítica, con cobaltina (negra, cristalina) diseminada en la matriz ankerítica (gris) y concentrada en la superficie estilolítica dibujada por materia orgánica (manchas minúsculas negras) y sericita (microcristalina, blanca). Muestra de Mina San Carlos. Luz transmitida, N//, 90X.

Figura 6.—Detalle de estilolito —contorno delimitado por residuos insolubles arcillosos (gris) y materia orgánica (negra, punteado o manchas diminutas)—, en brecha ankerítica (blanco): cobaltina (negra, cristalina) concentrada a lo largo de superficie estilolítica o creciendo a partir de ella hacia masa ankerítica; en parte interna del estilolito, monocristal de ankerita (gris). Muestra de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz transmitida, N//, 90X.

vetillas y bandas, frecuentemente asociadas con materia carbonosa. Existen también diseminaciones, zonas de cizalla y superficies de presión-disolución mineralizadas, aunque el significado cuantitativo de estas tres últimas, con respecto al contenido total de mena cobaltífera, es poco importante.

Pirita forma cristalillos y agregados framboidales diseminados, así como granos mayores, frecuentemente anisótropos y cataclásticos. No es raro que éstos estén cementados por una nueva

generación de pirita o bravoita-cattierita (no clásicas) o por cobaltina, eskutterudita o gersdorffita. Calcopirita suele encontrarse sellando microfisuras en pirita. Es frecuente la corrosión de pirita por cobaltina. En menas bandeadas, la pirita —aun reducida a clastos— tiende a disponerse hacia los bordes de las bandas, quedando en el centro la mena cobaltífera, textura que podría representar un bandeado pre-tectónico relicto. A juzgar por las propiedades ópticas —tonos rosados, comp. UYTENBOGAARDT y BURKE, 1971— observadas en algunos granos, hay ocasionalmente piritas cobaltí-

feras, lo que se ha confirmado con microsonda electrónica.

Los minerales cobaltíferos esenciales —cobaltina, eskutterudita— y gersdorffita están también frecuentemente tectonizados y pocas veces, a pesar de su tendencia al desarrollo idiomórfico, se presentan en fenocristales. Parece haber existido, no obstante, una primera generación de cristalinidad mucho más gruesa que la actual, a juzgar por los microclastos —sobre todo de eskutterudita y, en menor medida, de gersdorffita— que se observan todavía, con probables restos de una estructura zonada de mayores dimensiones (fig. 8);

o por las estructuras elongadas de cobaltina, representando posibles fragmentos de bandas mineralizadas, ahora englobados en eskutterudita masiva microcristalina.

La mena actual es generalmente microcristalina (fig. 9), especialmente cuando se encuentra en zonas de cizalla. Son frecuentes los cristales zonados, especialmente de eskutterudita y gersdorffita y, algo menos, los agregados esqueletiformes —con núcleo de ganga y/o calcopirita— de eskutterudita (fig. 10) o de cobaltina, así como el tapizado de poros por minerales cobaltíferos y la formación de granos o agregados mixtos de dichos

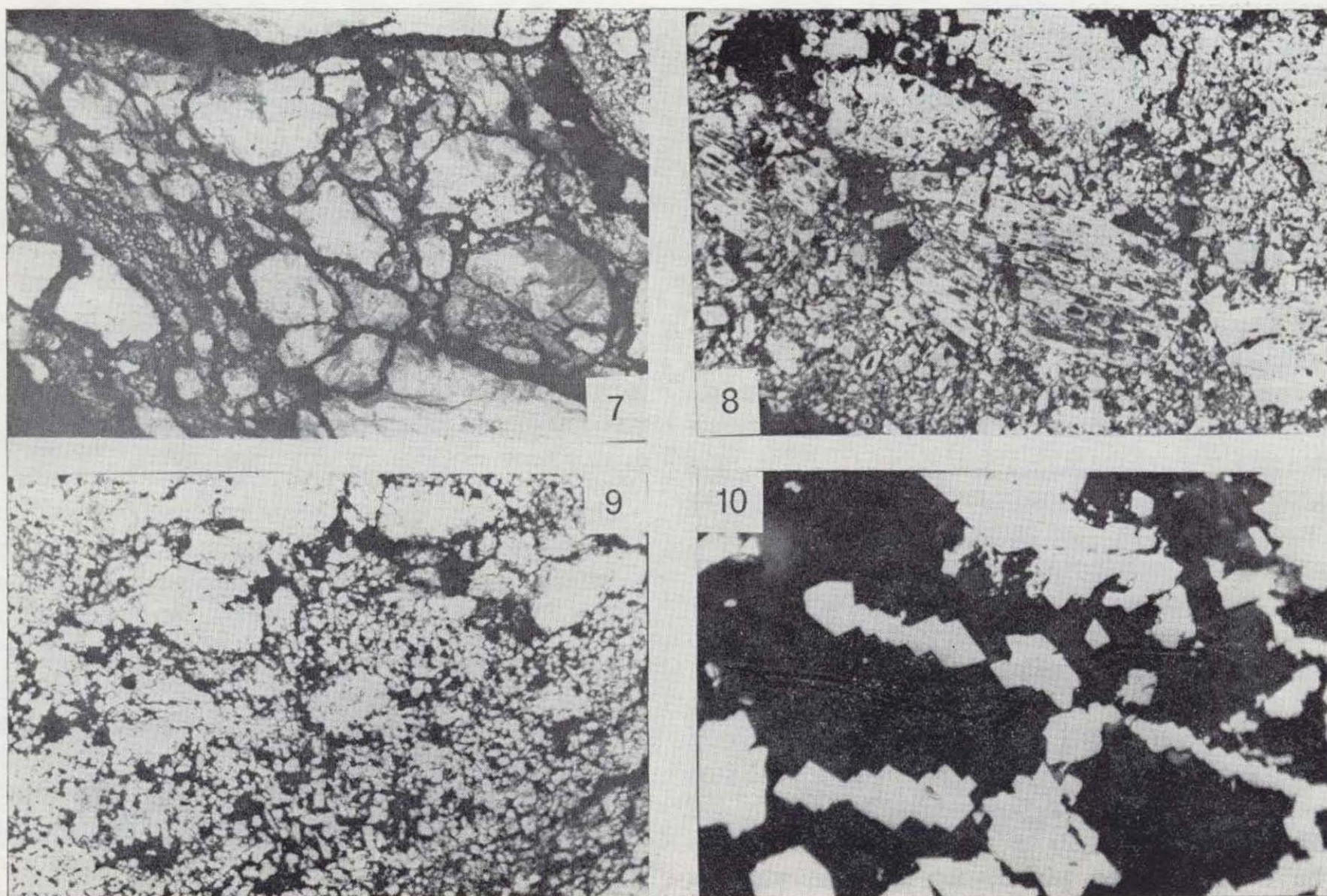


Figura 7.—Masa microcristalina de cobaltina (blanca), sometida a cataclasis, en ganga ankerítica (negra). Mena de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 50X.

Figura 8.—Masa cataclástica de eskutterudita (blanca) en brecha ankerítica: microcristales disseminados en ganga ankerítica (negra) y restos clásticos de cristalinidad más gruesa, con numerosas inclusiones de ganga. Mena de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 143X.

Figura 9.—Mineralización de cobaltina masiva (blanca) en ganga ankerítica (negra): cobaltina pretectónica masiva (clastos) y microcristalina de nueva generación, representada por cristallitos idiomórficos, poco o nada tectonizados, disseminados en ankerita. Mena de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 143X.

Figura 10.—Agregados esqueletiformes de eskutterudita (blanca) en ganga ankerítica (negra). Mena de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 400X.

minerales y ganga (especialmente, el revestimiento de cristales rombohédricos de ankerita por una corona de cobaltina, con o sin reemplazamiento o corrosión parcial —figs. 11 y 4— de la primera por la segunda).

Se han observado corrosión y sustitución de pirita (fig. 12) por cobaltina y de ésta por gersdorffita, bismutina, bismuto nativo, linneita y ganga, así como de eskutterudita por pararammelsbergita y gersdorffita. Los intercrecimientos o inclusiones mutuas son frecuentes; vgr., asociación íntima cobaltina-alloclasita (comprobada por difracción de rayos X), pequeñas inclusiones de ganga, bismutina, bismuto nativo en cobaltina; inclusiones de pararammelsbergita, cobaltina y ganga en eskutterudita, etc.

Cobaltina (fácilmente identificable por: su color blanco rosado, su débil anisotropismo y su elevada dureza), suele formar agregados microcristalinos —cristales generalmente idiomórficos—, con o sin alloclasita.

En eskutterudita se observan tres componentes —fig. 13—, correspondientes a los designados como eskutterudita-I-II-III por RAMDOHR (1980). El más abundante es el último (color blanco, con tono ligeramente verdoso, con objetivo de inmersión), que aparece, a modo de matriz, cementando y englobando a los demás: I (el más antiguo —clastos—, tono amarillento) y II (rosado, menor reflectancia, cementa a I). Se ha mencionado ya la existencia de una primera generación pre-tectónica, de cristalinidad gruesa, a juzgar por el aparente zonado residual observado. Los microcristales actuales muestran también un buen zonado, acentuado por ataque químico de estructuras con NO_3H 1:1 (10 segundos) o con 5 por 100 $\text{MnO}_4\text{K} + \text{SO}_4\text{H}_2$ 1:1 (20 segundos). Estos ataques ponen de manifiesto la cataclasis y las texturas brechoides de la mena, lo que también se ha observado en pirita, con simples ataques por Cl_2Hg (sat.) y por MnO_4K (sat.).

Gersdorffita suele encontrarse asociada a eskutterudita, especialmente en masas microcristalinas, mostrando las mismas texturas que ésta y reemplazándola a veces. El escaso poder diagnóstico de la observación con medios ópticos convencionales, cuando se trata de distinguirla de eskutterudita en las masas microcristalinas en que aparecen asociadas, hace que sea difícil precisar cuantitativamente la proporción en que está re-

presentada en la mena, pero en la mayor parte de los casos es mucho menos abundante que cobaltina o eskutterudita. De todas formas, su presencia se ha comprobado por difracción de rayos X y por ataque con Cl_2Hg (5 min.) y con MnO_4K (saturado); este último ha puesto también de manifiesto el carácter brechoide de la mena —figura 14— y la estructura zonada de los cristales de gersdorffita.

Glaucodoto forma cristallitos, inclusiones y agregados intercalados generalmente en cobaltina; su identidad se ha comprobado con microsonda electrónica. Ha de mencionarse también la presencia esporádica de probable arsenopirita en diminutos cristallitos diseminados.

Pararammelsbergita (*) suele presentarse asociada a eskutterudita. Forma agregados e inclusiones menores y rellena microfisuras en este mineral, al cual a veces parece reemplazar y del que se distingue fácilmente por el anisotropismo en tonos pardo-anaranjados y por la mayor reflectancia de pararammelsbergita, así como por el ataque diagnóstico con Cl_2Hg , que es negativo para eskutterudita. Rammelsbergita es mucho más escasa y se presenta también asociada a eskutterudita, formando pequeñas inclusiones —destacan por su vivo anisotropismo en tonos azulados— en la misma, con o sin pararammelsbergita.

Linneita (accesoria) reemplaza a cobaltina; bravoita —predomina probablemente el término cobaltífero cattierita, a juzgar por su color claro— se encuentra asociada con pirita, en cristales zonados generalmente, en los cuales pirita forma el núcleo, más o menos cataclástico y cementado por bravoita, que constituye la periferia, poco o nada tectonizada. Bismuto nativo y bismutina son minerales tardíos. Rellenan fisuras y reemplazan parcialmente a pirita y cobaltina, sobre todo a ésta, alrededor de la cual pueden depositarse con texturas en corona (fig. 12). Niquelina y los minerales en trazas —éstos (tetraedrita, pirrotina, marcasita, plata nativa?, magnetita), realmente muy es-

(*) La identidad de rammelsbergita y para-, contra lo que sería deseable, no se ha podido comprobar por medio de microanálisis. No obstante, las propiedades ópticas observadas —en especial, reflectancia mayor que eskutterudita de ambas y típico anisotropismo— hacen su identificación relativamente fiable. Lo mismo sucede con linneita y bravoita, sobre las que no ha sido posible realizar determinaciones cuantitativas químicas ni físicas.

casos, visibles solamente en raras ocasiones y con objetivos de inmersión de 25 o más aumentos— aparecen en diminutas inclusiones en la mena o diseminados en ganga. Su identificación no puede ser a veces, por este motivo, sino hipotética.

La escasez del grafito —diminutas pajuelas dispersas— a pesar de la relativa abundancia de materia carbonosa, testimonia una débil intensidad de metamorfismo. Los minerales titaníferos son rutilo, anatasa y esfena. Es frecuente la alte-

ración a leucoxeno, por efecto de disoluciones hidrotermales de baja temperatura.

Finalmente, los minerales descendentes, ya mencionados, se forman por alteración cementativa —calcosina, digenita, covellina— o por oxidación —limonita, predominando goethita sobre lepidocrocita; eritrina y annabergita; malaquita o azurita ocasionalmente— de las menas anteriores: calcopirita en el primer caso; menas de Fe-Co-Ni y Cu, respectivamente, en el segundo. Es de notar que los minerales oxidados, merced a la acción

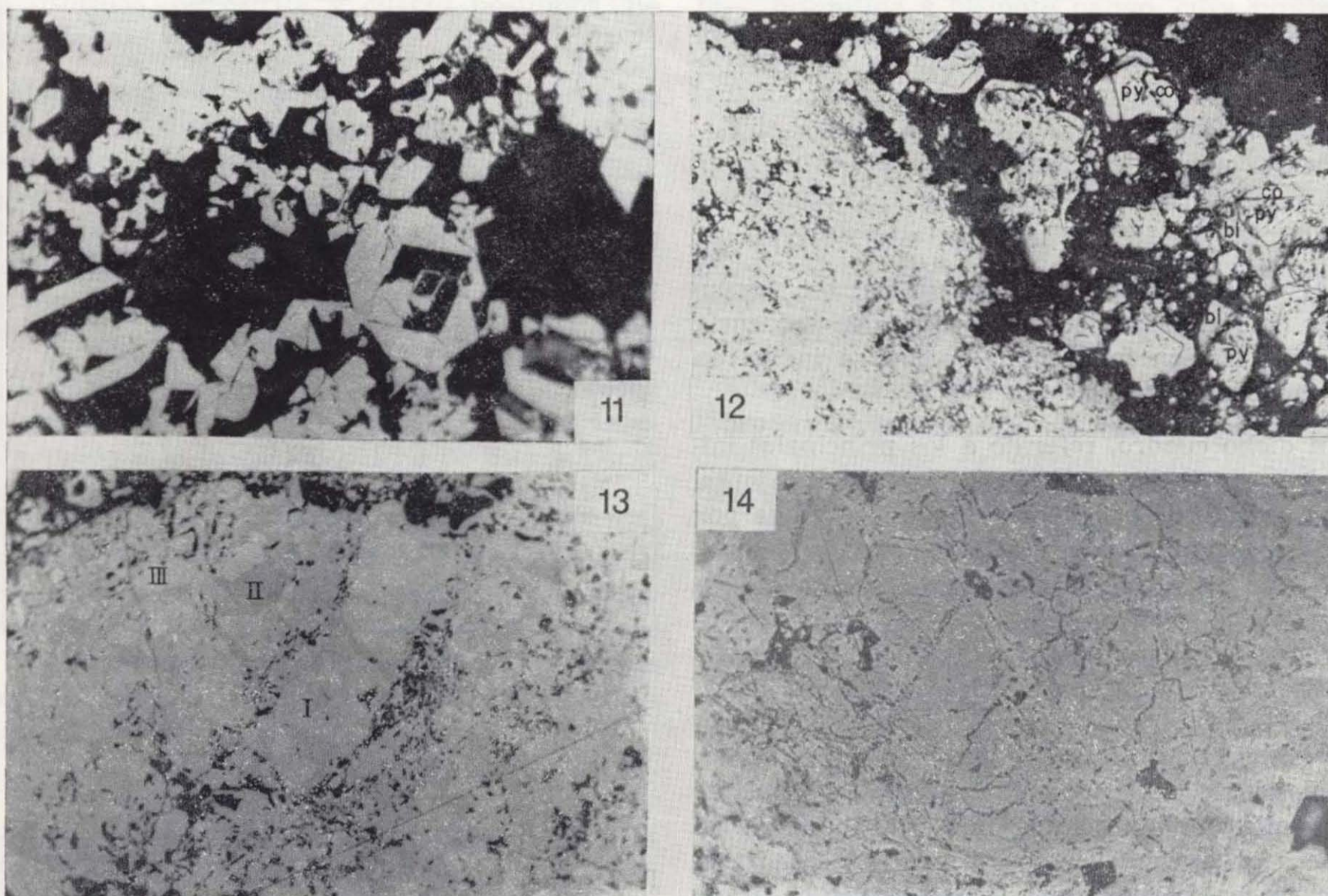


Figura 11.—Asociación de ankerita (negra) y cobaltina (blanca), en brecha ankerítica mineralizada (Mina San Carlos). Obsérvese, hacia el centro de la figura, la deposición alternante, a modo de zonado repetido, de ankerita —secciones romboédricas— y cobaltina y la corrosión de la primera por la segunda. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 400X.

Figura 12.—Brecha ankerítica mineralizada: masa microcristalina de cobaltina (blanca, ángulo inferior izquierdo), y ganga ankerítica (negra), con diseminación de agregados formados por cristales o clastos de pirita (py, mineral más antiguo) con corona de cobaltina (co, a veces corroe a pirita), cementados y corroídos por bismutina+bismuto nativo (bi, minerales más recientes). Mena de Mina San Carlos. Fotomicrografía con luz reflejada (aire), N//, 143X.

Figura 13.—Mena de eskutterudita de la Mina San Carlos: componentes I (fragmentado), II (cemento al anterior) y III (matriz). Fotomicrografía con luz reflejada (objetivo de inmersión en aceite), N//, 230X.

Figura 14.—Cataclasis interna en mena de gersdorffita (Mina San Carlos), puesta de manifiesto por ataque con MnO_4K (sat.). Fotomicrografía con luz reflejada (aceite), N//, 230X.

de las aguas percolantes, pueden impregnar paredes, poros y grietas, formando a veces llamativas estalactitas y concreciones, en zonas que no están situadas inmediatamente sobre el mineral primario. Existen también, como minerales descendentes, yeso, aragonito y —asociada a limonita, por meteorización de ankerita— calcita.

En una breve síntesis interpretativa, se podría concluir que, tras un primer estadio, en el que se deposita pirita, seguida por arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni (Fe) macrocristalinos —con toda probabilidad ligados a la ankeritización—, tuvo lugar una intensa actividad tectónica que milonitizó el nivel mineralizado, acompañada de removilizaciones, con recurrencia de algunos de los minerales citados, produciéndose una recristalización que dio a la mena su carácter actual microcristalino.

SERIE DE CRISTALIZACION

Las relaciones texturales expuestas son susceptibles de interpretación en términos de secuencia de cristalización mineral, tal como se indica en el cuadro número 1.

En dicho cuadro, referido a los principales minerales constituyentes de la mena y del encajante, se ha partido de la hipótesis inicial —avalada por la observación geológica, CASTROVIEJO y NODAL, 1985— de un nivel sedimentario —intercalado en las actuales pizarras silúricas— de caliza fosilífera, con abundante materia orgánica e impurezas arcillosas y con sulfuros —al menos pirita framboidal— diseminados, el cual ha sufrido dolomitización y, posteriormente, un muy débil metamorfismo regional, que sólo ha llegado a producir recristalización, transformación de productos arcillosos en sericita y una grafitización incipiente. Esta se manifiesta apenas por escasas pajuelas, minúsculas, de grafito, diseminadas sobre todo a lo largo de las superficies de presión-disolución que han sobrevivido a la posterior milonitización alpina.

Esta situación inicial se representa en el cuadro 1 por la columna (Estadio) I. El Estadio II corresponde a la fase principal de concentración y cristalización de la mena en el nivel anterior, el cual se ankeritiza (como se recordará, sólo las muestras correspondientes a dicho nivel aparecen mineralizadas en Co).

CUADRO 1
Serie de cristalización de los principales minerales de la mena cobaltífera

	I-ROCA SEDIMENTARIA DE PIRITA	II		III		IV - F. SUPERGENICA	
		ANKERITIZACION	TECTONICA	POST.	V-1	V-2	
Ankerita		—————	~~~~~	xxxx			
Dolomita	—						
Cuarzo	—		~~~~~	xx			
Calcita	—		~~~~~	xx			
Mat. carbonosa/grafito	—						
Pirita	—	—————	~~~~~	xx			
Cobaltina		—————	~~~~~	xxxxxxx			
Eskutrudita		—————	~~~~~	xxxxxxx			
Gersdorffita		—————	~~~~~	xxxxxxx			
Glaucodoto		—————	~~~~~	x			
Pararammelsbergita		—————	~~~~~	x			
Calcopirita	?	—————	~~~~~				
Bismutina, Bi nativo		—————	~~~~~				
Limonita, bravoita	?						
Niquelina							
Rutilo, etc.		—————	~~~~~				
Laucoosano							
Digenita							
Calcosina	?						
Covellina	?						
Eritrina							
Annabergita							
Malaquita, azurita							
Limonita							

————— Periodo Cristalización
 ~~~~~ Cataclasis  
 ~~~~~ Removilización  
 xxxxxx Recristalización

La cristalización inicial puede haber sido en parte sintectónica con respecto a alguno de los periodos de actividad hercínica, a juzgar por las manifestaciones —probablemente tempranas— de cataclasis que se encuentran en algunos minerales. Sin embargo, la intensidad y ubicuidad de los efectos tectónicos alpinos sobre el nivel mineralizado —afectado precisamente por el cabalgamiento, inmediato, de la Unidad de Los Millares sobre el Autóctono—, junto con la gran facilidad de estas menas metálicas para recristalizar —borrándose así las texturas anteriores—, hacen que no pueda precisarse con rigor la serie de acontecimientos registrados en épocas pre-alpinas.

Por ello, se ha señalado en el cuadro solamente una fase esencial de tectónica de fractura (III), con cataclasis y recristalización de los minerales principales de la mena, portadores de Co. Otros componentes como calcopirita y bismutina, debido a su mayor plasticidad, se han desplazado a fisurillas y cementan clastos de minerales duros, impregnan agregados de éstos, etc.; aparecen, pues, ahora, como minerales post-tectónicos —Estadio IV—, aunque es lógico pensar que se trata de una mera removilización, ya que no hay ninguna razón para imaginar una nueva fase (alpina) de aporte de estos minerales. En esta fase puede situarse también la cristalización, en fisurillas, de calcita y cuarzo póstumos, no deformados.

Finalmente —Estadio V—, han de situarse los episodios de alteración supergénica de los minerales anteriores, con una fase inicial (V-1) cementativa (digenita, calcosina, covellina) y una final (V-2) de oxidación (limonita, eritrina, annabergita, malaquita, azurita), que son consecuencia del progresivo descubrimiento del nivel mineralizado por los agentes erosivos, una vez levantada la cadena.

Es de notar que, por meteorización de la brecha ankerítica, se produce una calcitización de ankerita, unida a la oxidación del Fe de este mineral. Existe, pues, una generación final de calcita supergénica, que se presenta no sólo en estalactitas-estalagmitas y depósitos superficiales en las galerías, sino también asociada a limonita, reemplazando la masa de ankerita. Este proceso confiere a la roca el típico color ocre-pardo que presenta habitualmente en superficie, en los afloramientos descubiertos por erosión.

**CONDICIONES DE FORMACION.
CARACTERIZACION PARAGENETICA
DEL YACIMIENTO**

Por lo que respecta a las condiciones de formación, la paragénesis primaria queda definida, esencialmente, por los minerales pirita + cobaltina + eskutterudita ± gersdorffita ± glaucodoto ± pararammelsbergita, con ankerita y rutilo, en la zona de más alta temperatura, y por calcopirita + bismutina + Bi nativo, en la de temperatura más baja.

Se trata de una paragénesis hidrotermal, cuyo

rango puede atribuirse —no se han hallado características tipomórficas que permitan definirlo con mayor precisión— al intervalo cata-mesotermal. La cristalización comienza con la deposición de pirita y la serie de minerales cobalto-niquelíferos que se han citado en primer lugar, acompañados de ganga ankerítica y de rutilo, en condiciones probablemente catatermales. A medida que desciende la temperatura, se va produciendo una evolución en la composición mineralógica de la paragénesis depositada, desde cobaltina hasta pararammelsbergita, pasando gradualmente a los minerales de más baja temperatura, calcopirita —en parte, ya depositada en asociación con pararammelsbergita—, bismutina y bismuto nativo, cuya precipitación se extiende, posiblemente, hasta el final del rango mesotermal.

Esta secuencia, basada principalmente en criterios texturales —los minerales que se presentan rellenando microfisuras y cementando clastos han de ser más jóvenes que los minerales cementados—, concuerda, esencialmente, con los datos conocidos acerca de la posición paragenética de los minerales hallados (KOSTOV, 1968; RAMDOHR, 1980).

Además, puede afirmarse que esta paragénesis hidrotermal de temperatura intermedia-alta es de origen hipogénico. En efecto, aunque la aparente relación espacial del nivel ankerítico mineralizado con la discordancia permotriásica podía sugerir inicialmente la hipótesis de una mineralización de origen supergénico (paleo-superficie enriquecida en Co-Ni-Cu), la paragénesis primaria habría de ser, en este caso, de baja temperatura, lo que es incompatible con el rango hidrotermal hallado.

Es cierto que CROXFORD (1974) sugiere la precipitación de alloclasita como sedimento químico en el yacimiento de Mount Isa (NO Queensland, Australia), en el que dicho mineral sería el mineral primario de cobalto y cobaltina, su equivalente metamórfico. Pero el grado de metamorfismo (muy bajo-bajo) regional constatado en las rocas del área estudiada o el —prácticamente imperceptible— metamorfismo térmico que podría llegar a afectar a la zona mineralizada no podrían explicar, de ninguna manera, la transformación de una paragénesis exogénica, de baja temperatura, en la que se ha hallado realmente (meso-catatermal).

En suma pues, se trata de un yacimiento caracterizado por una paragénesis hidrotermal que podría asimilarse al grupo de las llamadas «forma-

ciones de cinco (seis) elementos»: Ni-Co-Bi-Ag-(As)-U, si bien con claras reservas. En primer lugar, falta aquí la plata (*), que suele caracterizar los yacimientos de este grupo, incluso los que podrían considerarse más próximos desde el punto de vista de la paragénesis y contenidos metálicos de la mena, como los yacimientos de Cobalt, Ontario (Canadá), los cuales, igual que el aquí investigado, carecen de menas de U y son relativamente —si se comparan, por ejemplo, con los típicos filones de Schneeberg, en el Erzgebirge (BAUMANN y cols., 1979)— pobres en bismuto.

En segundo lugar la paragénesis aquí hallada (**) es más simple y las dimensiones y entidad del yacimiento, mucho menores que las de los mencionados.

Así pues, se podría pensar en una concentración incipiente del tipo Ni-Co-Bi-As-(Ag), análoga a las de Cobalt (Ontario), aunque sin plata. Pero las particularidades señaladas sugieren, por otra parte, afinidades con concentraciones menores de Co o Co-(Ni), como las existentes —SCHNEIDER, HÖHN, 1962— en Alemania, en Siegerland o en el «Kobaltrücken» (Kupferschiefer, tipo Richelsdorf), o en los Alpes Orientales (Austria) en Zinkwand-Vöttern, siempre dentro del tipo citado de las «formaciones de cinco elementos».

CONTENIDOS METALICOS

Se ha realizado un total de 200 análisis, por absorción atómica, de contenidos metálicos (Co-Ni-Cu-Ag) de las litologías implicadas. Los resultados se sintetizan en los cuadros 2 y 3 y en las figuras 15, 16 y 17. Las muestras se han obtenido, en su mayor parte, por medio de rozas realizadas en los niveles o rocas correspondientes.

(*) Aparte de los análisis de brecha ankerítica que se han realizado, de los cuales resultan siempre contenidos en Ag menores que 2 p.p.m. (cuadro 3), se han examinado 28 probetas pulidas, por medios ópticos (microscopio de luz reflejada) y químicos (espectrometría por fluorescencia de Rayos X), sin encontrar más que vestigios de dicho metal.

(**) Dada la enorme escasez de menas en los sectores accesibles de las labores, cabe sospechar que, de haber podido encontrar un mayor número de muestras, para lograr una caracterización microscópica de la mena más exhaustiva, quizá se hubiesen hallado algunas especies más, aparte de las ya descritas, pero no es nada probable que esto alterase significativamente los resultados obtenidos.

CUADRO 2
Contenidos medios de Co (p.p.m.) de las principales litologías (*)

| LITOLOGIA | MINA S. CARLOS | ENTORNO MINA (EN SILURICO) | OTRAS ZONAS (NO SILURICO) |
|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| BRECHA ANKERITICA | (1) 742
(1,530-253) | (2) 469
(1,127-79) | (3) 53
(60-50) |
| CALIZA NEGRA BANDEADA | (4) 470 | (5) 50
(60-40) | -- |
| PIZARRA AMPELITICA | (6) 243
(180-29) | (7) --
(1,27-5) | -- |
| CUARCITA MICACEA | -- | (8) 60
(60-60) | -- |
| DIQUES PORFIDO | (9) 223
(840-60) | (10) 40
(57-30) | (11) < 1
(11-7) |
| GRANODIORITA DE BIELSA | -- | -- | (12) < 10
(15-7) |

(*) Para cada litología se indican en el cuadro, debajo del valor medio correspondiente y entre paréntesis, los valores máximo y mínimo de los contenidos hallados. Además, para cada valor medio se ofrecen, a continuación, dos cifras que indican —por este orden— el número de muestras analizadas y la desviación típica correspondiente:
(1) 20,402; (2) 21,368; (3) 5,4; (4) 1,—; (5) 2,14; (6) 16,208; (7) 7,30; (8) 2,0; (9) 12,216; (10) 2,14; (11) 4,—; (12) 4,—.

CUADRO 3
Valores medios de contenidos metálicos (Ni, Cu, Ag) de las principales litologías (*)

| LITOLOGIA | METAL | MINA SAN CARLOS | ENTORNO MINA (EN SILURICO) | OTRAS ZONAS (NO SILURICO) |
|------------------------|-------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| BRECHA ANKERITICA | Ni | (1) 181
(430-40) | (2) 213
(750-50) | -- |
| | Cu | (3) 366
(2,020-18) | (4) 90
(460-7) | -- |
| | Ag | -- | (5) < 2 | -- |
| CALIZA NEGRA BANDEADA | Ni | -- | (6) 45
(50-40) | -- |
| | Cu | -- | (7) 25
(30-20) | -- |
| | Ag | -- | (8) < 2 | -- |
| PIZARRA AMPELITICA | Ni | (9) 305
(415-200) | (10) 149
(220-100) | -- |
| | Cu | (11) 315
(552-80) | (12) 130
(230-14) | -- |
| CUARCITA MICACEA | Ni | -- | (13) 90
(100-60) | -- |
| | Cu | -- | (14) 5
(5-5) | -- |
| DIQUES PORFIDOS | Ni | -- | (15) 70
(90-50) | (16) 12
(20-10) |
| | Cu | -- | (17) 19
(30-8) | -- |
| | Ag | -- | (18) < 2 | -- |
| GRANODIORITA DE BIELSA | Ni | -- | -- | (19) < 10
(10-2) |

(*) Para cada litología se indican en el cuadro, debajo del valor medio correspondiente y entre paréntesis, los valores máximo y mínimo de los contenidos hallados. Además, para cada valor medio se ofrecen, a continuación, dos cifras que indican —por este orden— el número de muestras analizadas y la desviación típica correspondiente:
(1) 13,118; (2) 13,179; (3) 13,531; (4) 13,153; (6) 6,—; (6) 2,7; (7) 2,7; (8) 1,—; (9) 2,148; (10) 7,44; (11) 2,332; (12) 7,71; (13) 2,28; (14) 2,0; (15) 2,28; (16) 4,5; (17) 2,15; (18) 1,—; (19) 4,—.

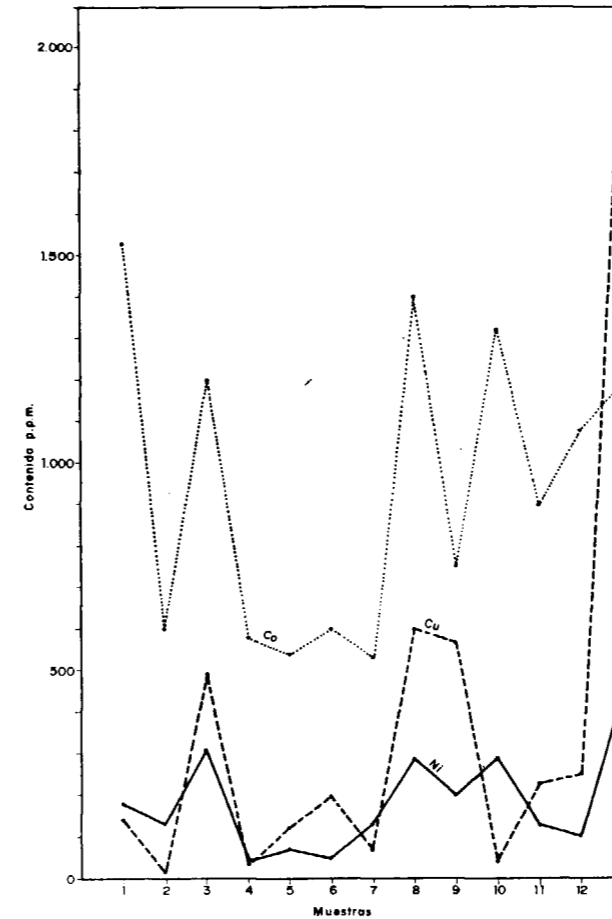


Figura 15.—Brecha ankerítica (Mina).

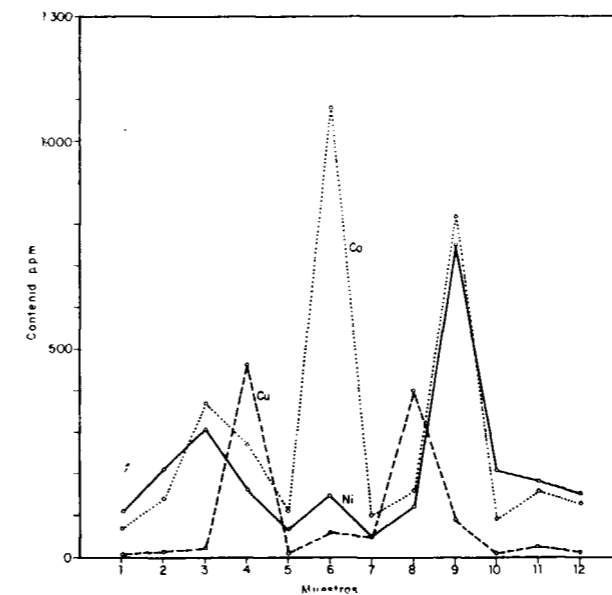


Figura 16.—Brecha ankerítica (entorno Mina).

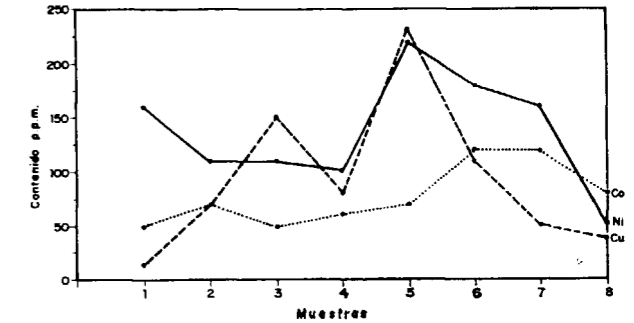


Figura 17.—Pizarra ampelítica.

Figuras 15 a 17.—Distribución de contenidos de Co-Ni-Cu (cuadros 2 y 3), en muestras de brecha ankerítica de la Mina San Carlos y de su entorno y en pizarras ampelíticas del área exterior a la mina.

Como se ve (cuadro 2) los valores más altos de Co se encuentran en la brecha ankerítica de la Mina San Carlos y —en menor medida— de su entorno. Las pizarras ampelíticas ocupan el segundo lugar. Por lo que respecta a las rocas ígneas, sólo se han hallado contenidos significativos en las muestras de la mina o de su entorno. Como rasgo general, ha de subrayarse, pues, que los contenidos mayores se hallan siempre en rocas que forman parte del Sistema Silúrico o que están emplazadas en el mismo. Esto es especialmente notorio en la roca ankerítica: en las muestras tomadas fuera del Silúrico —columna tercera— sólo se hallaron valores comprendidos entre 50 y 60 p.p.m. de Co, con un valor medio (53) de 9 a 11 veces inferior al de las tomadas en el seno de dicho sistema (469 y 742, entorno y Mina S. Carlos, respectivamente).

Se dispone de menos datos acerca de los contenidos de Ni-Cu-Ag (cuadro 3). Prescindiendo de la plata —contenidos por debajo del límite de detección de 2 p.p.m. en todas las litologías—, se pueden señalar dos características principales de los resultados obtenidos: i) los mayores contenidos se encuentran en la brecha ankerítica y en las pizarras silúricas, siendo los valores para Ni-Cu de ambas litologías comparables o, a veces —Ni en las muestras de la Mina S. Carlos, primera columna—, francamente superiores en la segunda de ellas (pizarras); ii) en las rocas ígneas sólo se han hallado valores significativos (70 p.p.m. Ni) en los diques emplazados en las pizarras ampelíticas.

Así pues, en síntesis, sólo muestran contenidos altos de Co-Ni-Cu, las rocas silúricas (en especial, pizarras ampelíticas) o las relacionadas espacial o genéticamente con dicho Sistema (en especial, brecha ankerítica).

PROCESOS GENERADORES

Puesto que toda interpretación genética ha de responder al marco geológico en el que se sitúa el objeto investigado, se enumeran, en primer lugar, una serie de observaciones o características geológicas del yacimiento estudiado, de las que un modelo genético coherente ha de dar razón, necesariamente:

- 1) la estructura del yacimiento, determinada por la geometría del nivel mineralizado, se adapta, a grandes rasgos, a la del zócalo paleozoico plegado, en el que se ubica (a una escala de detalle, esta coincidencia es difícil de establecer, por las distorsiones introducidas por la tectónica alpina de cabalgamiento);
- 2) hay cierta proximidad espacial entre el nivel mineralizado y la superficie de discordancia permotriásica, en la zona de la Mina San Carlos y labores adyacentes; no así en los restantes indicios;
- 3) no se observa ninguna relación directa e inmediata entre mineralización y magmatismo. Hay cierta relación indirecta (a través de las fallas E-O) entre la brecha ankerítica y el sector de la granodiorita de Bielsa aflorante a lo largo del cauce del Cinqueta, pero no se ha podido establecer con claridad una relación significativa —aparte de cierta coincidencia espacial, en algunos sectores— entre el magmatismo representado por los diques y dicha roca;
- 4) se trata de una mineralización ligada a una roca ankerítica metasomática; las relaciones texturales observadas sugieren cierta simultaneidad entre los procesos de ankeritización y la deposición de la mena cobaltífera;
- 5) la distribución espacial de esta brecha ankerítica obedece a un marcado control tectónico, fundamentalmente por grandes fracturas E-O, cuyo origen se ha interpretado

en relación con el emplazamiento de la intrusión granodiorítica;

- 6) dicha roca sólo aparece mineralizada en Co-Ni-Cu cuando se encuentra intercalada entre las pizarras ampelíticas silúricas, por lo que puede decirse también que la mineralización es estrato-ligada, con respecto al nivel ankerítico, en dichas pizarras;
- 7) los análisis realizados ponen de manifiesto que los máximos contenidos en Co-Ni-Cu se dan en la brecha ankerítica y, en segundo lugar, en las pizarras ampelíticas, siendo las demás litologías silúricas más pobres y, en especial, las rocas magmáticas, no emplazadas en el Sistema Silúrico, mucho más pobres en dichos metales.

Teniendo en cuenta que la aparente relación espacial (2) no es genética, con respecto a la brecha ankerítica, sino circunstancial, debida a la erosión (post-mineralización y pretriásica), que casi llegó a descubrir el nivel mineralizado —quizá también a la posterior tectónica de cabalgamiento, que podría haber eliminado los posibles tramos pizarrosos intercalados—, es fácil ver que las características 1-3 convergen con las consideraciones paragenéticas expuestas anteriormente, descartando la citada hipótesis, a primera vista plausible, de una paleosuperficie permo-triásica mineralizada, ya que, en tal caso, se podría esperar que: 1) no hubiese relación con la estructura del zócalo; 2) hubiese relación directa y permanente con la discordancia permotriásica; 3) no hubiese relación directa ni tectónica —a través de fallas E-O— entre roca filón y rocas magmáticas hercínicas.

En síntesis, una interpretación coherente de la génesis del yacimiento ha de dar cuenta simultáneamente del control tectónico, de la relación con la intrusión granodiorítica, del metasomatismo, de las condiciones de formación cata-mesotermiales, de los contenidos metálicos hallados, del carácter estrato-ligado de la mineralización y de su confinamiento dentro del Silúrico, de forma que la brecha ankerítica es estéril cuando se presenta fuera de este Sistema.

La estrecha relación entre procesos de mineralización cobaltífera y metasomatismo ankerítico, entre éste y las grandes fallas E-O y, finalmente, entre éstas y la intrusión granodiorítica, permite deducir que en la génesis de la mineralización

han intervenido las disoluciones hidrotermales derivadas de la consolidación de dicha intrusión, las cuales son responsables asimismo de los procesos de ankeritización observados esporádicamente a lo largo de la traza de dichas fallas; éstas han servido de vías de propagación a dichas disoluciones.

Pero ha de explicarse, todavía, cuál es la fuente de los metales Co-Ni-Cu, ya que, si éstos fuesen de derivación magmática y hubiesen sido transportados por las disoluciones hidrotermales mencionadas, sería de esperar que apareciesen indicios de mineralizaciones en cualquier lugar donde hubiese manifestaciones hidrotermales, es decir, asociados a la roca ankerítica en cualquier indicio, cosa que no ocurre. La consideración de los contenidos metálicos hallados en las distintas litologías (Cuadros 2 y 3) ofrece, a pesar del limitado número de datos para algunas litologías (en especial, rocas ígneas), una clave al respecto.

Las pizarras ampelíticas son las rocas que muestran una relación más constante con los enriquecimientos metálicos. En efecto, las demás rocas —incluida la brecha ankerítica— sólo muestran contenidos elevados cuando están en relación con dichas pizarras, es decir, en la mina y en su entorno (columnas primera y segunda de los cuadros 2 y 3).

Aún prescindiendo, por su singularidad, de las muestras tomadas en el interior de la mina, el más bajo contenido medio de Co hallado en pizarras silúricas (77 p.p.m., zonas exteriores a la mina) resulta relativamente alto, si se tiene en cuenta que la abundancia media de dicho metal en pizarras es del orden de 19 a 20 p.p.m. (según TUREKIAN y WENDEPOHL, 1961, y VINOGRADOV, 1962, en RÖSLER y LANGE, 1972).

Por el contrario, los contenidos que podrían considerarse más representativos de las rocas ígneas —se exceptúan las muestras emplazadas en rocas silúricas, posiblemente contaminadas por las pizarras— no son en absoluto anómalos. En efecto, según los autores citados, la abundancia media de Co en rocas ígneas de composición intermedia-ácida varía entre 1 y 10 p.p.m. En las muestras analizadas, los contenidos máximos hallados son de 10 p.p.m. en pórfidos y menores (inferiores al límite de detección de 10 p.p.m.) en el granitoide de Bielsa, en el que podría sospecharse que se acer-

can al valor normal de 5 p.p.m. obtenido por VINOGRADOV (1962, en RÖSLER y LANGE, 1972).

Lo mismo cabría pensar acerca del Ni y del Cu, si se comparan, con el mismo criterio, los valores medios más bajos obtenidos para las pizarras silúricas y los obtenidos para las rocas ígneas no contaminadas por dicha litología, con los correspondientes para pizarras y rocas magmáticas intermedias y ácidas, según los autores citados (cuadro 4).

CUADRO 4

Contenidos metálicos de Co-Ni-Cu en la serie de San Juan de Plan (SJP) y abundancias litosféricas medias de dichos metales en los mismos tipos litológicos

| | Co | Ni | Cu |
|---|-------|--------|-------|
| PIZARRAS SILURICAS SJP | 77 | 149 | 100 |
| PIZARRAS LITOSFERA (*) | 19-20 | 69-95 | 45-57 |
| DIQUES SJP | <10 | 12 | - |
| GRANODIORITA SJP | <10 | <10 | - |
| MAGMATITAS INTERMEDIAS Y ACIDAS LITOSFERA (*) | 1-10 | 4,5-15 | 10-30 |

(*) ROSLER y LANGE (1972).

En consecuencia es lógico suponer que la fuente de los metales está en las mismas pizarras ampelíticas.

El papel de las disoluciones hidrotermales quedaría así limitado a la redistribución de los metales contenidos —enriquecidos por preconcentración sedimentaria— en el tramo ampelítico, dando lugar a la precipitación preferente de los metales en el horizonte ankerítico. Este resulta de la ankeritización de un nivel calcáreo fosilífero, supuestamente dolomitizado, intercalado en las pizarras ampelíticas.

Así pues, la secuencia de acontecimientos que da lugar a las mineralizaciones supone:

- 1) Silúrico. Preconcentración sedimentaria metálica en pizarras ampelíticas, con algunas intercalaciones calizas.

2) Orogenia Hercínica. Intrusión de la granodiorita de Bielsa, creación de las fracturas mayores E-O, hidrotermalismo que se propaga y produce acciones metasomáticas a lo largo de dichas fracturas, y preferentemente, en los tramos silúricos carbonatados, lugares favorables también para la precipitación de metales movilizados de las pizarras silúricas.

Desde el punto de vista metalogénico, la serie de acontecimientos posteriores, fundamentalmente pertenecientes al ciclo alpino, no hacen ya sino dispersar las concentraciones metálicas preexistentes y trastornar las estructuras mineralizadas, siendo responsables, asimismo, de la brechificación del horizonte ankerítico, que adquiere así su actual y característica textura (brecha ankerítica).

El conjunto de procesos resumidos en el punto 2 podría explicarse, con mayor detalle, como sigue. Como consecuencia de los empujes debidos a la intrusión granodiorítica, se producen fracturas E-O (CASTROVIEJO y NODAL, 1985) que servirán de vías de circulación para las emanaciones hidrotermales, derivadas de dicha intrusión en las etapas finales de su consolidación. Estas producen intensas alteraciones hipogénicas en las rocas circundantes, especialmente en los diques de pórfido, en los que los efectos deutéricos son prácticamente ubicuos. La presión ejercida por dichas disoluciones ha debido de ser moderada, sin llegar a producir aperturas importantes de las fracturas citadas, ya que no se observan prácticamente fenómenos de relleno hidrotermal en las mismas.

La circulación de estos fluidos, que dan lugar a impregnaciones esporádicas del encajante, se ve dificultada, al ascender hasta el Silúrico, por la plasticidad —que amortigua la fracturación, disminuyendo el espacio abierto— y por la impermeabilidad de las pizarras ampelíticas (Silúrico). Las intercalaciones carbonatadas (dolomitizadas) en dichas pizarras constituyen un medio mucho más permeable (poroso) y reactivo que éstas, lo que da lugar a la circulación preferente de las disoluciones a lo largo de dichas intercalaciones, produciéndose una intensa ankeritización y la precipitación del contenido metálico de Co-Ni-Cu-Fe, en los antiguos niveles dolomíticos (hoy «roca-filón» o brecha ankerítica).

De esta forma, las disoluciones pueden dar lugar a la misma roca ankerítica a lo largo de todo

su recorrido, siguiendo durante 2 km. la traza de las fallas E-O, pero ésta sólo está mineralizada en el Silúrico, que es donde aquéllas han podido enriquecerse más en Co-Ni-Cu, al lixiviar o movilizar, por la introducción de un gradiente térmico, dichos metales, previamente concentrados en las pizarras. Por otra parte, la existencia de un medio reductor, constituido precisamente por las pizarras ampelíticas, principal litología del Silúrico, facilita el que la precipitación tenga lugar en las rocas de este Sistema.

Esta interpretación, al precisar el papel jugado por el metasomatismo, en relación con las fallas E-O, y el proceso de concentración fundamental, a partir de las pizarras ampelíticas, discrepa de la propuesta por MALIVERNEY (1973), el cual sugería que la mineralización era de origen profundo.

En cambio, el modelo genético ahora elaborado concuerda, en líneas generales, con el propuesto por BOYLE (1968) para los yacimientos de Cobalt (Ontario, Canadá), quien considera que se trata de vetas de secreción lateral, es decir, rellenas por materiales derivadas del encajante (sedimentos y rocas verdes de la serie Keewatin).

A este respecto, es interesante comparar los análisis facilitados por dicho autor con los obtenidos en la presente investigación (cuadro 4). Los contenidos en Co de las rocas de la serie Keewatin oscilan entre 67 y 74 p.p.m. y son, por tanto, todavía ligeramente inferiores a los hallados en las rocas de las que, según se ha postulado, se deriva el Co del yacimiento ahora investigado: pizarras ampelíticas, con 77 p.p.m. de Co en promedio. Asimismo, los valores de Ni (105-160 p.p.m.) y Cu (120-420 p.p.m.) publicados por dicho autor están también en consonancia con la interpretación propuesta (compárese con cuadro 4).

No puede sorprender la entidad, incomparablemente mayor, de los yacimientos de Cobalt, si se tiene en cuenta el marco geológico del escudo canadiense en que éstos se ubican y la mayor intensidad de metamorfismo —y, por tanto, del gradiente térmico y de las migraciones de fluidos— propia de dicho ámbito.

CONCLUSIONES

Se trata de una mineralización meso-catatermal compuesta esencialmente por arseniuros y sulfo-

arseniuros de Co-Ni (cobaltina, eskutterudina, gersdorffita, pararammelsbergita, glaucodoto, allosclita...), con sulfuros (pirita, calcopirita, bismutina, bravoita, marcasita...) y bismuto nativo subordinados.

La mineralización se distribuye de forma muy irregular, en el seno de un nivel ankerítico brechoide, en el que forma pequeñas bolsadas, rellena vetillas, etc. En todo caso, está limitada a las pizarras ampelíticas silúricas.

Su origen se explica por secreción lateral, a partir de pre-concentraciones metálicas sedimentarias contenidas en dichas pizarras, en relación con fluidos hidrotermales emanados, durante el ciclo hercínico, de la intrusión granodiorítica de Bielsa y propagados a favor de grandes fracturas E-O, los cuales producen, por ankeritización de intercalaciones carbonatadas, el actual horizonte mineralizado. Se explica así el carácter estrato-ligado y el control tectónico del yacimiento.

Desde el punto de vista de la paragénesis y del modelo genético propuesto, que difiere de los hasta ahora elaborados, se establecen puntos de contacto con los yacimientos del tipo Cobalt (Ontario).

En el ciclo alpino, tiene lugar una serie de trastornos tectónicos relacionados con el inmediato cabalgamiento de Los Millares, produciendo milonitización y dislocaciones que dificultan enormemente el seguimiento de las estructuras mineralizadas.

De la interpretación genética propuesta se desprende la potencial importancia, para una exploración de ámbito regional, del Sistema Silúrico (pizarras ampelíticas), como metalotecto para mineralizaciones similares a la estudiada. Como paso previo, habría de partirse de una caracterización geoquímica de dicho Sistema más completa y rigurosa que la realizada, dada la pobreza de afloramientos y el carácter limitado y local del presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto Nacional de Industria y a la E. N. Adaro las facilidades dadas para la realización de este trabajo y la autorización para publicarlo.

En memoria del Prof. PAUL RAMDOHR († 8-III-1985).

BIBLIOGRAFIA

- AMSTUTZ, G. C., y PARK, W. C.: *Styrolites of Diagenetic Age and their Role in the Interpretation of the Southern Illinois Fluorspar Deposits*. Mineralium Deposita, 2, 44-53 (1967).
- BAUMANN, L.; NIKOLSKIJ, I. L., y WOLF, M.: *Einführung in die Geologie und Erkundung von Lagerstätten*. Verlag Glückauf, Essen, 503 pp. (1979).
- BOYLE, R. W.: *The Geochemistry of Silver and its Deposits*. Geol. Survey of Canada, Bull. 160, Ottawa, 264 pp. (1968).
- CASTROVIEJO, R., y NODAL, T.: *Estudio Geológico de las concentraciones de Co-(Ni-Cu) en el Silúrico de San Juan de Plan, Valle de Gistain (Pirineo de Huesca)*. Bol. IGME (en prensa) (1985).
- CROXFORD, N. J. W.: *Cobalt Mineralization at Mount Isa, Queensland, Australia, with References to Mount Cobalt*. Mineral. Deposita (Berl.), 9, 105-115 (1974).
- KOSTOV, I.: *Mineralogy*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 587 páginas (1968).
- MALIVERNEY, C.: *Géologie et métallogénie du gîte de cobalt de Gistain dans les Pyrénées espagnoles*. Bull. BRGM, sect. II, núm. 6, pp. 433-448 (1973).
- MALLADA, L.: *Descripción Física y Geológica de la Provincia de Huesca*. Mem. Com. Mapa Geol. de España, tomo VI, Madrid, 439 pp. (1878).
- RAMDOHR, P.: *The Ore Minerals and their Intergrowths* 2nd Ed., Pergamon Press, Oxford, 1207 pp. (1980).
- RÖSLER, H. J., y LANGE, H.: *Geochemical Tables*. Elsevier, Amsterdam, 468 pp. (1972).
- SCHNEIDERHÖHN, H.: *Erzlagerstätten*. G. Fischer Verlag, Stuttgart, 371 pp. (1962).
- UYTENBOGAARDT, W., y BURKE, E. A. J.: *Tables for Microscopic Identification of Ore Minerals*. 2nd Ed., Elsevier, Amsterdam, 430 pp. (1971).

Recibido: Abril de 1985.