

Estudio geológico del yacimiento de Fornás (Santiago).^(*)

PASCUAL, E. (**); ESTEVEZ, A. (***)



RESUMEN

El objetivo de este trabajo ha sido la obtención y la aplicación de los datos geológicos en la prospección minera de un determinado tipo de mineralización de sulfuros. En él se presentan resultados del estudio petrográfico y estructural detallado de un sector reducido del Complejo de Ordenes, situado al E. de Santiago de Compostela.

El análisis de los datos obtenidos permite relacionar este tipo de cuerpo mineralizado con fracturas de desgarre tardías de dirección aproximada N140E. son por tanto posteriores a todas las etapas de deformación que producen esquistosidad y/o plegamiento. Probablemente los sulfuros han sido preconcentrados en la migmatización posterior a la fase de deformación F_4 .

Se sugiere finalmente un modelo que explica los hechos observados.

ABSTRACT

The essential scope of this work has been the application of the geological data on mining exploration of a particular kind of sulphide ore bodies, such as the ones of Fornás and Arinteiro. Structural and petrographic results have been carried out through detailed survey of the Fornás area, which constitutes a small part of the Ordenes Complex located to the E of Santiago de Compostela.

Analyses of these data allow to relate these ore bodies to late fractures trending about N140E, which develop after all deformational events yielding associated foliation and/or folding. The sulphides probably were preconcentrated contemporaneously to the migmatization event occurring after the F_4 deformational phase.

Finally, the authors suggest a model for the explanation of all the geological facts observed in the Fornás area.

1. LOCALIZACION DEL SECTOR ESTUDIADO

El sector estudiado aparece en el mapa estructural, a escala 1:50.000, de A. Van ZUUREN (1969), incluído en las metabasitas del complejo de Ordenes (fig. 1). En el seno de estas metabasitas se encuentra la mineralización, cuyo origen ha sido el objeto de este estudio.

2. ESTUDIO SOBRE EL TERRENO

Ha consistido en esencia en la toma de datos y en su situación precisa sobre fotogramas, a escala aproximada 1:10.000. A partir de ese fotograma se han constituido una serie de superponibles con la inclusión de los distintos datos.

(*) Trabajo realizado con la colaboración y autorización de la Compañía General de Sondeos (C. G. S.) y el Instituto Geológico y Minero de España (I. G. M. E.).

(**) Dpto. de Petrología. Universidad de Granada.

(***) Dpto. de Geotectónica y Geomorfología. Universidad de Granada.

Las particularidades de relieve y vegetación en la zona obligan a trabajar a base de hacer observaciones más o menos puntuales en los pequeños afloramientos existentes, dispersos y numerosos. La toma de datos y muestras resulta asimismo un tanto dispersa y la reconstrucción geológica tropieza con dificultades, desde el momento en que no se dispone de niveles de referencia.

Por las razones reseñadas se ha seguido un orden lógico en el trabajo. En primero lugar se confeccionó un mapa de afloramientos en el que se situaron todos los puntos de observación existentes en el área. Este mapa ha servido de base para la elaboración ulterior de todos los datos obtenidos.

3. MAPAS LITOLÓGICOS Y DE INDICIOS

En la fig. 2 se han reflejado los datos concernientes a las diversas observaciones de carácter litológico, hechas en el campo y completadas tras el estudio microscópico de láminas, estableciéndose así dominios de determinadas características. De este modo resaltan varios hechos importantes:

1°. Los puntos con piroxeno, están incluidos, en general, en las zonas que contienen granate. Estas zonas son muy irregulares. El estudio microscópico muestra que ambos minerales están fuertemente retrometamorfizados, de modo que su distribución superficial no obedece a ningún patrón ni estructural ni composicional.

2°. El límite de las zonas en que aparecen numerosas segregaciones e inyecciones de venas leucocratas, procedentes de removilizaciones, posiblemente ligadas a anatexia, es también relativamente irregular y no coincide con el límite de zonas granatíferas. Es posible que exista una ligera tendencia de estas zonas a orientarse en direcciones N14E, en coincidencia con fracturas de las que se hablará más adelante. De todos modos esta tendencia no está suficientemente clara.

3°. La distribución de los sulfuros aparece más o menos claramente ligada a direcciones N130E-N150E, en algunos casos en coincidencia con zonas removilizadas tardíamente. Más adelante se volverá sobre esta cuestión.

4. ESTUDIO ESTRUCTURAL

4.1. MAPA ESTRUCTURAL (Fig. 3)

En él se han representado la esquistosidad principal S_4 , la linealidad sinuosa 1_4 y los ejes de pliegues postesquistosos.

Se debe aclarar que, tras el estudio microscópico, la S principal observada en el campo no es la S_3 sino la S_4 ya que en los granates antiguos existe una esquistosidad interna que se ha considerado como S_1 .

La presencia de un «close jointing» tardío bien sistematizado se ha interpretado como conectado a un plegamiento tardío del que se hablará posteriormente. Por tal razón en el mapa estructural se ha representado la intersección $C_j \times S_4$ y se la ha interpretado como congruente con ejes de pliegues postesquistosos tardíos.

También en este mapa se han representado las fallas y zonas fracturadas observadas en los distintos puntos.

Con sólo observar la distribución superficial de S_4 , se pueden delimitar varios dominios estructurales diferentes: unos en que la S_4 se orienta regionalmente marcados con la letra R y otros con la S_4 en dirección anómala (entre N60E y N100E), señalizados con la letra A. Esta distinción es necesaria para poder interpretar estructuralmente el área estudiada y sacar, posteriormente, una serie de consecuencias en relación con la evolución tectónica de la misma y, por ende, con la génesis de la mineralización.

4.2. ELABORACION E INTERPRETACION DE LOS DATOS DE CAMPO (figs. 4, 5 y 6)

Se ha utilizado la falsilla equiareal de Schmidt y se ha tomado el hemisferio inferior para todas las representaciones.

A) *Representación de la S principal* (fig. 4 a y b). En estos diagramas se han representado los polos de las medidas de S_4 , para dominios R y A, respectivamente.

Ambos muestran máximos de concentración, que indican la existencia de plegamientos postesquistosos con generación de pliegues poco apretados, hecho que ya se había comprobado a escala mesoscópica.

Como la diferencia de orientación de S_4 entre dominios R y A sólo puede deberse a pliegues cartográficos y/o fallas, las cuales sólo podrían haber originado desplazamientos (pero no rotaciones de mucha cuantía), se pueden superponer los dos diagramas con objeto de ver la distribución de la equistosidad en todo el sector estudiado. Efectuada esta superposición, se obtiene que la distribución de polos de S_4 sigue dos círculos máximos, cuyos polos correspondientes (fig. 4a) materializan las orientaciones de los ejes de los plegamientos postesquistosos. De este modo se pone de manifiesto que existen dos plegamientos con superficies axiales bastante verticalizadas: uno, en la dirección aproximada N50E-N60E con un eje fuertemente inclinado en este sentido; y otro, aproximadamente N-S con eje menos inclinado hacia el N. La superposición de ambos plegamientos sobre la S_4 originaría una geometría en «caja de huevos» oblicua, de escala cartográfica observable en áreas más extensas (ver mapa estructural de Van ZUUREN, 1969).

Con sólo ambos plegamientos postesquistosos se puede explicar la disposición actual, bastante buzante, de la S_4 sin necesidad de admitir un plegamiento previo que apartase fuertemente dicha esquistosidad de la posición horizontal. Así, pues, admitimos que S_4 era subhorizontal antes de los pliegues aludidos y que su posición actual se debe a la interferencia de ambas fases de plegamiento. Asimismo, los micropliegues correspondientes poseerán ejes inclinados en función de la situación local de S_4 y no tienen por qué ser horizontales, aun cuando los ejes cartográficos de estos plegamientos lo sean en algún punto.

La cronología relativa de estos plegamientos postesquistosos y suaves es imposible establecerla, por lo que indistintamente los denominamos pliegues de fases 5 y 6.

B) *Representación de pliegues mesoscópicos* (fig. 4c).

Se han incluido los ejes medidos directamente en el campo y los deducidos a base de medidas en los flancos. Se han añadido algunas medidas de crenulaciones observadas en venas de cuarzo. Igualmente se han incluido las representaciones de las superficies de simetría para los pliegues deducidos a partir de medidas de flancos, con objeto de poder asignarlos a una dirección u otra de plegamiento en aquellos casos en que los ejes presentan fuerte inclinación. Sobre el diagrama aparecen también dos líneas que indican las superficies axiales de los dos plegamientos postesquistosos atribuibles a las 5 y 6 fases.

Se observa que los micros y los mesoplegues se ordenan perfectamente según las dos direcciones N50E a N60E y N-S, ya deducidas a partir de los diagramas anteriores. Asimismo, se ve que son pliegues bastante inclinados, sobre todo los de dirección N50-60E. En el área estudiada aparece mayor número de pliegues menores según esta última dirección que según la dirección N-S, lo cual sugiere que aquella corresponde probablemente a pliegues de menor longitud de onda y quizá más apretados.

Los pliegues postesquistosos observados en el campo son poco apretados, disarmónicos y asociados, quizás tardíamente, a las segregaciones post- F_4 (ver resumen del estudio petrológico, tabla I). Su particular geometría sólo se explica admitiendo una gran plasticidad en las metabasitas, la cual sólo puede relacionarse con la fase anatética post-esquistosa. Los esfuerzos compresivos regionales que originarían estos plegamientos se situarían entre las direcciones E-W y N140E.

C) *Representación del «close jointing»* (fig. 4 d).

En este diagrama se ha incluido, además, la orientación de la S_4 , en los puntos en que tal estructura se presenta, y la intersección de ambas superficies, que se ha interpretado como li-

nearidad de intersección paralela a los ejes de pliegues más tardíos de fase 7, de los que no se ven otras estructuras menores que el mencionado «close jointing». Durante esta fase deformacional las metabasitas se comportarían ya de modo frágil.

Este «close jointing» se muestra en diversos puntos del sector estudiado (ver mapa estructural) como un diaclasado bien sistematizado relleno por clinzoisita \pm cummingtonita acicular \pm cuarzo semejante al de zonas fracturadas (ver tabla I), que forma generalmente un ángulo entre 60° y 90° con S_4 . En contados casos el ángulo es menor de 50° .

Al representar en el diagrama las distintas posiciones del «close-jointing» y las de la S_4 , se observó que ambas superficies se situaban mayoritaria y conjuntamente en un mismo círculo máximo subvertical de dirección aproximada N70E. Esto hizo pensar en que tal distribución obedecía a un nuevo plegamiento poco apretado con ejes de dirección aproximada N160E. De este modo el «close jointing» representaría un diaclasado tensional (diaclasa rotacionales y radiales) generado a modo de esquistosidad de fractura y que generalmente forma ángulos mayores de 60° con la S_4 (fig. 5a). Por tal razón se han representado las intersecciones $C_j \times S_4$ en falsilla y en el mapa estructural ya que nos darán la situación local de tal linealidad. Como era de esperar esta linealidad está dispersa en virtud de su superposición a una estructura previa producida por las fases 5 y 6.

Los esfuerzos regionales habría que situarlos en dirección aproximada N70E.

D) *Representación de linealidad sinesquistosa* (figs. 5b y 6a).

El diagrama 6a demuestra que las estructuras lineales sinesquistosas l_4 de fase F_4 (ejes de pliegues, linealidad de orientación o de crenulación) se distribuyen a lo largo de un círculo máximo que representa la orientación regional de S_4 . Sólo se apartan las medidas efectuadas en los dominios A, de las cuales, de todos modos, existen pocas medidas.

La dispersión de l_4 a lo largo de estos círculos máximos sólo es explicable por la existencia previa de la fase F_4 de otras deformaciones F_2 y F_3 , las cuales, por otra parte, han sido detectadas en ciertos puntos gracias a existencia de interferencia de pliegues (fig. 5b).

La deducción más interesante del diagrama es que, en virtud de la congruencia existente entre ejes de pliegues de F_4 y la linealidad de la orientación de minerales, ésta es claramente una linealidad b, paralela a los ejes de los pliegues.

E) *Representación de fracturas* (fig. 6b, c y d).

Las estructuras de fractura no penetrativa son las más recientes de las observadas. Todas ellas parecen obedecer a la existencia de esfuerzos horizontales, que se deducirán a partir de la distribución y/o régimen de tales fracturas.

La fig. 6b muestra la distribución de las diaclasas, la mayor parte de las cuales son verticales. De la distribución de los máximos se deduce la existencia de esfuerzos compresivos máximos según las direcciones N108E, y N66E. Existe además, una tercera dirección N173E menos clara que las anteriores.

En virtud de estos esfuerzos se originarían numerosas diaclasas de cizalla de dirección aproximada E-W y otras, menos numerosas, según las direcciones N133E y N38E.

Los círculos menores reseñados en el diagrama corresponden al lugar geométrico de los polos de fractura originados por tales esfuerzos.

La deducción de los esfuerzos viene apoyada, por otra parte, por el estudio de la distribución de fallas, en alguna de las cuales se conoce el régimen con que han funcionado. Las fallas son en general más o menos verticales y han funcionado como desgarres. Algunas microfallas son inversas. De ellas en la fig. 6a se han numerado las de régimen conocido y/o que presentan estrías que han podido medirse en el campo. A partir de las fallas, se han obtenido, para la orientación del esfuerzo máximo, las siguientes direcciones N114E, N7W y N61E (fig. 6d), bastante congruentes con los resultados deducidos a partir de diaclasas. Para las fallas, sin embargo, los dos primeros esfuerzos citados son los más netos.

Como consecuencia de la actuación de los esfuerzos N114E y N61E, se generan algunos desgarres E-W (coincidentes con un buen número de diaclasas) que han podido funcionar sucesivamente como dextrorsos y sinistrorsos.

Las fallas de la corta de Fornás N60E pueden corresponder a fallas mixtas (dextrorsas +

inversas) originadas por el esfuerzo N114E, ya que se sitúan sobre el círculo menor correspondiente al mismo (ver fig. 6c y d). En favor de esta suposición está el hecho de que el límite SW de mineralización está desplazado de acuerdo con un juego dextrorso, aparte de que existen estrias con un «rake» de unos 50°W.

El esfuerzo N114E produce, sin embargo, de modo preferente desgarres sinistrorsos de dirección media N140E, que son los más patentes en el mapa estructural. Por su parte, el esfuerzo N61E origina desgarres dextrorsos de dirección aproximada N20E, como los que afectan a la mineralización en la corta. El esfuerzo N173E origina algunas microfallas inversas de dirección aproximada E-W y algunos desgarres sinistrorsos de dirección N20E.

El pequeño número de fallas vistas no permite hacer más precisiones, e incluso las conclusiones serían objetables si no fuera porque las diaclasas constituyen un buen aval que confirma estas deducciones.

El esfuerzo más antiguo parece ser el de dirección N114E y el más moderno el N61E, por las razones que a continuación se expresan:

1.ª En la corta de Fornás las fallas mixtas de dirección N60E y buzamiento entre 43°N y 56°N, muy probablemente originadas, como ya se ha mencionado, por el esfuerzo N114E, están cortadas por fallas dextrorsas de dirección N10E a N30E, producidas por el esfuerzo N61E.

2.ª Como se explicará más adelante, las mineralizaciones siguen preferentemente los desgarres sinistrorsos de dirección N140E y las virtuales diaclasas tensionales asociadas, que serían las únicas fracturas existentes en el momento de la formación de los posibles yacimientos y que se habían originado bajo la actuación del esfuerzo N114E. Estas mineralizaciones serán más tarde afectadas y, en parte, removilizadas por fallas debidas a las otras situaciones de esfuerzo, que carecen comúnmente de mineralizaciones asociadas.

3.ª Las dispersiones en los esfuerzos deducidos para las fallas 3, 6, 10, 11, 13 y 14 (ver pág. 6c y d) con una dirección media de esfuerzo compresivo de N61E, puede explicarse sencillamente porque muchas de ellas corresponden a fracturas que ya existían en virtud de los esfuerzos anteriores y posteriores han sido rejuvenecidas. Así, por ejemplo, las fallas 13 y 14, que son desgarres N-S dextrorsos, pudieron originarse ya durante el esfuerzo N-S como fracturas (diaclasas) tensionales. En consecuencia al actuar el esfuerzo N61E, en lugar de crearse desgarres dextrorsos con una dirección teórica de N31E se aprovecharán ciertos planos de debilidad ya existentes y más o menos próximos a esta dirección. En resumen, la mayor dispersión observada para la distribución de las fracturas correspondientes al esfuerzo N61E aboga en favor de que éste ha sido el que ha actuado más recientemente.

Se puede pues concluir, aún cuando las razones antes expuestas, consideradas por separado, son de muy distinto valor, que durante los procesos de fracturación:

1.º Se han originado simultáneamente fallas y diaclasas, bajo cada uno de los distintos estados de esfuerzos a que se han visto sometidas las metabasitas.

2.º La sucesión cronológica relativa de los esfuerzos compresivos máximos responsables de la fractura parece ser la siguiente: esfuerzo N108E a N114E; esfuerzo N7W; esfuerzo N61E a N66E. Esto implica que las fracturas más antiguas son las de dirección N133E a N140E, que son precisamente las mejor representadas en la cartografía (al menos en cuanto a fallas se refiere).

3.º La fracturación es un fenómeno tardío, respecto al plegamiento, que ocurre cuando las rocas son frágiles. El resultado de una tectonización más o menos intensa, que puede llegar a dar texturas cataclásticas. Los minerales asociados al proceso de fracturación se reflejan en la tabla I, correspondiente al resumen del estudio petrológico.

4.3. INTERPRETACION DEL MAPA ESTRUCTURAL

A la luz de todo lo que antecede se ha interpretado el mapa estructural tal como puede verse en la fig. 7.

Los límites entre dominios A y R han sido interpretados en base a dos hechos totalmente distintos:

A) *Límites de dominio ligado a fallas.* El límite de dominios de dirección N140E que pasa al W, SW y S de la corta de Fornás se ha considerado como desgarre sinistrorso por varias razones: a) se trata de una línea paralela a la traza de los desgarres sinistrorsos, tan numerosos en el área, y, en especial, en la cercanía de este límite; b) no se han localizado, ni en la proximidad de dicho límite ni en toda el área estudiada, pliegues menores que puedan servir de base para interpretar el paso de dominios como la traza de superficie axial de un gran pliegue de envergadura cartográfica; c) las direcciones axiales de los micropliegues observados no coinciden en ningún caso con la dirección N140E.

Por las mismas razones, el dominio A, situado al N de la corta se ha limitado por fallas, dos de ellas paralelas y de dirección N130E (desgarres sinistrorsos) y otra transversal, subparalela a las observadas en los alrededores de la explotación de Fornás y consideradas como inversas y dextrorsas. También el dominio R de la esquina SW del mapa se ha limitado paralelamente por fallas N140-150E, en función de las múltiples fallas que, con tal dirección, se observan en los alrededores.

Todas las fallas consideradas como límites de dominios se han originado en el esfuerzo compresivo más antiguo, de dirección N108E-N114E.

B) *Límites de dominios ligados a trazas de superficies axiales de pliegues cartográficos.* Se han interpretado de este modo aquellas alineaciones en que se han medido pliegues menores postesquistosos cuyas direcciones axiales son congruentes con la dirección de tales alineaciones. También se ha tenido en cuenta la falta en dichos puntos de fallas convenientemente orientadas.

Dentro de esta categoría se halla la mayor parte de los límites entre dominios A y R situados en la esquina SW de la cartografía en la que se ha interpretado la traza de S_4 en función de medidas locales de ésta y de los pliegues postesquistosos existentes. En esta porción de la cartografía se observa que los pliegues cartográficos son congruentes con los pliegues menores post-esquistosos de la dirección axial N50-60°E.

En el área estudiada no se observan límites de dominios en relación con los otros pliegues post-esquistosos que se han descrito previamente.

Por último, cabe reseñar que existen además otras estructuras que no delimitan dominios estructurales. Entre éstas, se pueden citar buen número de fallas y, en especial, las de dirección N130-140E, que son las más patentes en cartografía. Se han extrapolado las trazas de las fallas en función de las observaciones más o menos puntuales, teniendo presente los indicios de sulfuros¹.

4.4. RELACION ENTRE LA GEOMETRIA DE LA MINERALIZACION Y LA ESTRUCTURA DE LAS ROCAS ENCAJANTES

A la luz de los datos ya expuestos y teniendo presentes los del estudio de láminas delgadas, resulta claro que la mineralización rellena fracturas, en especial los desgarres sinistrorsos de dirección aproximada N140E.

Ninguna de las estructuras sinesquistosas ni ninguno de los pliegues postesquistosos afectan a la mineralización. Ni tan siquiera el «close jointing», última de las estructuras penetrativas observadas, está relacionado con ella. Por supuesto la mineralización no sigue la S_4 o S principal, cosa evidente en los dominios A, en los que es claramente transversa a ella y sigue los desgarres cartografiados.

Por otra parte las removilizaciones tardías que causan un aumento del tamaño del grano de las metabasitas, como ya se ha apuntado anteriormente, a veces parecen coincidir con los desgarres sinistrorsos de dirección N140E. Sin embargo, hay que insistir que, de acuerdo con el estudio petrológico, se trata de procesos distintos y separados en el tiempo, que pueden

¹ El utilizar los sulfuros como indicadores de la presencia de fallas se basa en que éstas están generalmente mineralizadas y en que en el estudio petrológico de las láminas siempre se han visto las mineralizaciones de sulfuros en relación con fracturas.

coincidir en el espacio en virtud de la existencia probable de líneas de debilidad precoces de dirección semejante a la de los desgarres posteriores.

Las mineralizaciones más importantes tapizan principalmente las fracturas de dirección N140E, que se muestran actualmente como desgarres sinistrorsos y que probablemente serían las únicas fracturas existentes en el momento de originarse los yacimientos de sulfuros. El relleno se ha podido efectuar bajo la acción del esfuerzo N108-114E, aprovechando huecos virtuales creados en virtud de la irregularidad de las superficies de falla o en virtud de la formación de diaclasas tensionales («gash joints») ligadas a los desgarres (ver fig. 8).

El caso de Fornás parece obedecer a este último supuesto, ya que la mineralización se presenta en dirección aproximada E-W y se acuña lateralmente de modo que sus extremos están doblados congruentemente con el régimen sinistrorso de los desgarres. Al mismo tiempo, que se producen estos rellenos, la roca de caja es mineralizada a corta distancia de las fracturas por sulfuros dispersos, que se muestran como intersticiales y tardías en las láminas delgadas.

Las fracturas posteriores, originadas por los esfuerzos N7W y N61-66E, parecen haber producido exclusivamente ligeras removilizaciones y algunos desplazamientos en los yacimientos que ya existían previamente.

Conviene insistir en el carácter tardío de la mineralización, que ha sido corroborado por el estudio petrológico. La única mena opaca, observada con el microscopio, que ha sido afectada por las distintas deformaciones sinuquistas, no corresponde a sulfuros, sino a minerales de titanio opacos (posiblemente ilmenita).

5. ESTUDIO PETROLOGICO

Para establecer con mayor seguridad la génesis de las metabasitas del área estudiada y la de los yacimientos de sulfuros que en ella se encuentran, se ha efectuado el estudio petrológico de una serie de muestras que se han considerado representativas tanto de las rocas encajantes como del cuerpo mineralizado.

5.1. RESULTADOS A PARTIR DE LAS LAMINAS DE METABASITAS

Los resultados correspondientes se resumen en la tabla I.

Tal como se acaba de puntualizar en el apartado anterior, los sulfuros son tardíos y corresponden a la fase tardía de fracturación. Pueden aparecer más o menos dispersos en zonas tectonizadas o localizados en fracturas junto a cuarzo \pm albita clorita \pm óxido de hierro. No se han observado sulfuros en las fases anteriores a la fracturación.

Antes de continuar hay que advertir que, salvo las evidentes coincidencias respecto a la existencia de un metamorfismo antiguo de facies granulita seguido por diversas fases de grado medio (retrometamorfismo), existen algunas divergencias, en cuanto a conclusiones petrológicas y estructurales, entre este trabajo y el realizado por Van ZUUREN (1969). De todos modos, estamos de acuerdo con este autor en que la diferencia entre la primera fase metamórfica y las siguientes debe relacionarse con un cambio radical de las condiciones termodinámicas en función de la profundidad en la corteza en la que se producen las transformaciones metamórficas.

5.2. RESULTADOS A PARTIR DE LAS LAMINAS DE LA MINERALIZACION

A partir de estas láminas se ha podido establecer la siguiente secuencia de cristalización:

- 1.º Estaurolita + gedrita aluminica.
- 2.º Pargasita + hidrobiotita.

3.º Hercinita o espinela s.str. + plagioclasa ($An_{21} \longrightarrow An_{24} \longrightarrow An_{27} \longrightarrow An_{33}$). La plagioclasa exhibe ligera zonación inversa. La hercinita implica un medio pobre en silice en el que puede generarse por descomposición de la estauroлита.

4.º Mineralización de sulfuros + clorita + cuarzo, en la que se distinguen dos subfases: 1.ª, pirrotina mayoritaria + clorita; y 2.ª, calcopirita mayoritaria + clorita. Ambas subfases están separadas por una etapa de microplegado y brechificación. El cuarzo ha de situarse, en conexión con los sulfuros, como un mineral tardío ya que su cristalización sería incompatible con la formación simultánea de espinela s.l.; ello implicaría las simplectitas desarrolladas sobre espinela al ser corroidas éstas por el cuarzo.

Tanto la hidrobiotita como la clorita y la estauroлита se han comprobado mediante difracción de rayos X, por su gran importancia para la interpretación del yacimiento.

Salvo las espinelas, la plagioclasa y el cuarzo, los demás minerales de la ganga indican que la mineralización se ha efectuado en un medio no precisamente anhidro, hecho que, como se verá más adelante, tiene su importancia en los procesos de mineralización y/o de colocación de la masa mineralizada.

La presencia de minerales, como la estauroлита y las espinelas, implica un alto contenido en alúmina en la ganga, lo cual ya establece una seria dificultad a la hora de intentar asignarle un origen directamente ligado a rocas básicas o metabásicas.

De acuerdo con diversos autores, como HOSCHEK (1969), GANGULY (1972) y WINKLER (1974, 4.ª ed.), si bien la estauroлита es característica del metamorfismo de grado medio, el límite superior de la misma puede exceder fácilmente de los 700° C a una presión de unos 5'5 kbars., aún en presencia de cuarzo y moscovita. Si faltan estos minerales, el campo de estabilidad de dicho mineral puede exceder de los 800° C.

En el yacimiento de Fornás, la estauroлита y la gedrita —si bien pudieron generarse, al menos en parte, durante el metamorfismo de grado medio a partir y en el seno de pelitas (quizá con intercalaciones de rocas ígneas)—, debieron resistir la elevación térmica tardía, señalada por Van ZUUREN (1969), la cual conduce a la anatexia de los metasedimentos de los Complejos de Santiago y de Ordenes. Esta fase anatética es equiparable a la etapa metamórfica post-F₄ detectada en el área investigada. La posterior cristalización de plagioclasa en ligera zonación inversa (oligoclasa andesina sódica), concordante con las zonaciones inversas de las plagioclasas de las segregaciones leucocratas tardías en las metabasitas, es un hecho que apoya la idea de que en la génesis de la ganga es de particular importancia la fase de removilización anatética que se ha de encuadrar en el marco regional del metamorfismo de grado alto o el magmatismo tardío asociado.

La mena, sin embargo, es tardía e intersticial y paragenética de la clorita y el cuarzo (en sentido lato). Esto parece indicar que la cristalización de los sulfuros debió ocurrir en condiciones de metamorfismo de grado bajo o como producto de procesos hidrotermales o pneumatólíticos más o menos ligados al metamorfismo regional en su fase más tardía.

6. RECAPITULACIONES Y CONCLUSIONES

La descripción precedente contiene hechos de importancia para cualquier interpretación genética de este yacimiento. Estos hechos pueden resumirse como sigue:

1.º Ninguna de las estructuras sinquistosas de los pliegues postesquistosos afecta a la mineralización actual. Ni la secuencia de fases de deformación ni la mineralogía de las metabasitas se corresponden con las observadas en la mineralización.

2.º Los sulfuros rellenan y tapizan fracturas, en especial los desgarres sinostrosos de dirección N140E y diaclasas asociadas a ellos que debían ser las únicas fracturas existentes en el momento de la mineralización. En las proximidades de las fracturas se produce una mineralización dispersa claramente tardía.

3.º El relleno de estas fracturas parece haber aprovechado huecos virtuales proporcionados por la irregularidad de las superficies de falla o por el desarrollo de diaclasas tensionales

(«gash joints») ligadas a los desgarres. Esta última posibilidad parece explicar bien la geometría de la mineralización en la corta de Fornás.

4.º A veces existe coincidencia espacial de las zonas de falla mineralizadas y algunas removilizaciones en metabasitas. Esta convergencia espacial no es necesaria, de modo que puede haber removilizaciones en las metabasitas que no están mineralizadas y desgarres sinistrorsos mineralizados en zonas en que las metabasitas no están removilizadas.

5.º Las fallas posteriores, ligadas a los esfuerzos N7W y N61E-N66E, parecen haber producido exclusivamente removilizaciones y algunos desplazamientos en los yacimientos ya existentes.

6.º La ganga es de composición muy aluminica y está constituida por estauroilita, gedrita aluminica, pargasita, hidrobiotita, hercinita y espinela s.str., plagioclasas (oligoclasa andesina sódica), clorita y algún cuarzo. Los cuatro primeros minerales citados forman cristales idiomorfos mientras que las espinelas y la plagioclasa forman cristales xenomorfos e intersticiales.

7.º Los sulfuros, junto a la clorita, constituyen la paragénesis más tardía observada en la corta de Fornás. De éstos, la pirrotina precede generalmente en su cristalización a la calcopirita. Toda la mena es tardía e intersticial.

8.º Las deformaciones en el cuerpo mineralizado de Fornás se reducen a pliegues centimétricos y «Kink bands» milimétricos que afectan a la ganga y a los sulfuros (esencialmente la pirrotina que llega a constituir un nivel de despegue) y a una tectonización que produce brechas cementadas esencialmente por calcopirita y clorita de nueva generación. Estas estructuras se relacionan indudablemente con movimientos relativos a lo largo de los desgarres sinistrorsos N130E-N140E de otras fracturas asociadas a ellos. Los «Kink bands» y la brechificación son prueba de un comportamiento tardío, relativamente frágil, del material implicado en la mineralización.

A la luz de todos estos datos se abre paso, la hipótesis de que la mineralización está ligada a las removilizaciones anatécticas tardías, aunque durante fases anteriores a la que produciría los yacimientos actuales. En dichas fases anteriores se generaría buena parte de los minerales de la ganga en el seno de metapelitas. La ganga, junto a los sulfuros que también se encontraban en las metapelitas, podría haber migrado a zonas de debilidad precoces (charnelas de pliegues postesquistosos; zona de fracturación, ... originados durante la fase anatéctica), para ocupar un lugar que no sería aún el definitivo. En estos lugares previos debieron formarse concentraciones relativas de sulfuros y gangas aluminicas, en las que existiría una importante fase fluida. La cristalización de anfiboles e hidrobiotita en macrocristales relativamente orientados sugiere un medio de relativa tranquilidad, pero caracterizado por anisotropías (fallas, charnelas de pliegues, y, en general, zonas de debilidad precoces) o bien por anisotropías creadas por campos de esfuerzos en los que la compresión máxima actúa según direcciones E-W a N140E (en el momento de la formación en las metabasitas de pliegues laxos disarmónicos). La buena cristalización de los minerales de la ganga previos a los sulfuros sugieren asimismo un enfriamiento lento en lugares de cierta profundidad, que no tenían por qué estar situados en el seno de las metabasitas.

Al mismo tiempo en éstas se originan removilizaciones tardías post- F_4 (no necesariamente mineralizadas), también según zonas probablemente de debilidad. Posteriormente, algunas de estas zonas removilizadas pudieron ser afectadas por desgarres sinistrorsos N140E, que eventualmente pueden coincidir con el alargamiento máximo de tales zonas.

Entre movilizaciones en las metabasitas y estas fallas N140E, más o menos mineralizadas, existiría una convergencia indirecta en cuanto a su origen, lo que explicaría la ocasional convergencia espacial, aunque no temporal).

Esta convergencia no es siempre necesaria, de modo que puede haber removilizaciones en las metabasitas que no están mineralizadas, zonas removilizadas coinciden con desgarres sinistrorsos, mineralizadas o no, y zonas de metabasitas no removilizadas con yacimientos importantes en zonas afectadas por los desgarres N140E (ver mapas litológicos y de indicios, y fig. 9).

La condición más necesaria para la existencia de concentraciones importantes es que existan desgarres sinistrorsos de dirección N140E que en profundidad hayan afectado a zonas removilizadas de metapelitas con sulfuros los cuales en este momento penetran (bajo la actuación del esfuerzo N108E-N114E y quizá en función de la alta presión de fluidos intersticiales) en los huecos virtuales que estos accidentes proporcionan. El relleno se efectuaría ya en condiciones metamórficas de grado bajo o en condiciones hidrotermales (o quizá pneumatolíticas) relacionadas con procesos metamórficos tardíos. Los fluidos mineralizantes, o, quizá el sulfuro a modo de masa plástica, arrastrarían a los minerales de la ganga formados a mayor profundidad en condiciones de presión y temperatura más elevadas.

La estructura y la textura están indudablemente relacionadas con movimientos relativos a lo largo de las fracturas ya mineralizadas. Aunque los pliegues disarmónicos tiene lugar en virtud de la plasticidad de los sulfuros, la brechificación y los «kink bands» son prueba de un comportamiento frágil del material (al menos en parte), que sólo puede explicarse por la actuación renovada de las fallas mineralizadas.

Por otro lado, como ni la secuencia de deformaciones ni la mineralogía se corresponden con las observadas en las rocas de caja, ni tampoco es posible compaginar el alto contenido en alúmina de la ganga con la composición de las metabasitas, se llega a la conclusión de que la mineralización y su ganga proceden de una diferenciación en rocas distintas a las metabasitas, probablemente en una serie vulcano-sedimentaria (pelitas con probables intercalaciones de rocas ígneas) en la que ya existiría un «protoyacimientos» de sulfuros. Las metapelitas, que habrían de tener una composición muy aluminica, compatible con la formación de estauroлита (GANGULY, 1972; HOSCHEK, 1969) se encontraría en posición infrayacente respecto a las metabasitas en el momento de la anatexia y de las removilizaciones post-F₄ y podrían corresponder al Complejo de Santiago o, incluso, al propio Complejo de Ordenes.

Durante la fase anatética se producirían concentraciones importantes de sulfuros, con proporciones variables de estauroлита, gedrita aluminica, hidrobiotita, pargasita, espinela s.l. y plagioclasa.

Finalmente, durante la etapa de fracturación y, en especial, la debida al esfuerzo compresivo N108E-N114E, los sulfuros vuelven a removilizarse en condiciones metamórficas de grado bajo para alcanzar su posición actualmente observable en las metabasitas, en virtud de procesos hidrotermales o pneumatolíticos, o bien por inyección forzada de material plástico. En todos estos posibles procesos la presión de fluidos ha jugado un papel importante.

Si se pretendiese localizar el «protoyacimientos» de sulfuros o el originado subsecuentemente en la etapa anatética, habría que buscarlos, de acuerdo con la hipótesis expuesta, fuera de las metabasitas, probablemente en los metasedimentos infrayacentes, ya que la actual situación de los sulfuros en las metabasitas obedece a la existencia de desgarres sinistrorsos de dirección aproximada N140E.

Por último, en lo que respecta a criterios geológicos de proyección minera, conviene resaltar las siguientes conclusiones:

1.^a La existencia de desgarres sinistrorsos de dirección aproximada N140E es del máximo interés en la prospección de sulfuros. Son igualmente muy interesantes las diaclasas tensionales ligadas a los mismos (caso de Fornás). La presencia de tales desgarres puede ponerse de manifiesto por métodos estructurales (definición de dominios estructurales, zonas milonitizadas más o menos cloritizadas o epidiotizadas, etc.) o por métodos cartográficos indirectos, como la presencia en superficie de indicios de sulfuros diseminados o concentrados en pequeñas fracturas, que se alineen según direcciones aproximadas N140E.

2.^a La existencia de removilizaciones alineadas según esta última dirección no es definitiva para la prospección. Sólo puede presentar interés si estas zonas removilizadas coinciden con los desgarres sinistrorsos mencionados, ya que de todos modos, pueden existir yacimientos en metabasitas no conectados con tales removilizaciones.

3.^a No existen en el seno de las metabasitas controles estructurales ligados a las esquistosidades ni a los pliegues postesquistosos, debido a que la mineralización es muy tardía.

4.^a No existen tampoco controles petrológicos en función de la presencia o falta de minerales, como piroxenos y granates, o de «ojos» de feldespatos.

BIBLIOGRAFIA

- ARPS, C.E.S.;VAN CALSTEREN, P.W.C. Van; HILGEN, J. D.; KUIJPER, R.P. y DEN TEX, E. (1977) - Mafic and related complexes in Galicia: an excursion guide. Leidse Geol. Med., d. 51, p. 63-94.
- GANGULY, L. (1972) - Staurolite Stability and parageneses: theory, experiments, and applications. Journ. of Petr., v. 13, part. 62, pp.335-365.
- HOSCHEK, G. (1969) - The stability of staurolite and chloritoid and their significance in metamorphism of pelitic rocks. Contr. Min. and Petr., 22, pp. 208-232
- VAN ZUUREN, A. (1969) - Structural petrology of an area near Santiago de Compostela (NW Spain). Tesis. Leidse Geol. Med., d. 45, p. 1-71.

F ₁ - S ₁	F ₂ -S ₂	METAMORF. INTER F ₂ - F ₃	F ₃₋₄ - S ₃₋₄
TITAN. en cristales pequeños. MENA Ti. opaca CLINOPIROX.: DIOPS.-SAL. en general. AUG. (qTi), a veces GRAN. Debió producirse el 1º bandeado de las metabasitas en condiciones de <u>metam. de grado alto:</u> GRANULITAS BASICAS El bandeo, antes de las fases retrometamórficas, debió estar marcado por concentraciones diferenciales de granate y piroxeno.	TSCHERM. TSCHERM. verde azul (formada sobre granates y pirox. TITAN. en cristales pequeños PLAG.alterada, quizá de composición más anortit. que la actualmente existente, distribuida en bandas o venas según S ₂	TSCHERM. verde azul, procedente de gran. y pirox. FENOBLASTOS de TSCHERM.-KAERSUT. TSCHERM. con ±Ti y ±Na Presentan desmezcla de rutilo e ilmenita. La zonación hacia los bordes a txchermakita (anfíbol verde) debe corresponder a fases posteriores. TITAN.en cristales grandes. RUT. SENOMORFO. MENA Ti. con coronas de titanita. PISTAC. en cristales grandes, a veces sinplectítica. CIRCON(?) APATITO en cristales grandes. PLAG.alterada y/o albitizada en fases posteriores. Posiblemente cálcica y zonación normal: An → →An ₅₅ En venas más o menos oblicuas a S ₂	TSCHERM.-KAERSUT. TSCHERM. TSCHERM.con + Ti + Na →TSCHERM. Con zonación normal a tsccherm. menos titanífera, que afecta igualmente a los fenoblastos precedentes. TITAN. en cristales pequeños MENA Ti con coronas de titanita. PISTAC.en cristales + grandes Fracturación del apatito. PLAG. en zonación normal: Andesina-Oligoclasa Ca An ₄₆ →An ₃₆ →An ₂₈₋₂₀ →An ₂₃ (x) Metamorfismo de grado medio sincinemático. Trasposición del bandeo precedente, plegamiento del mismo y formación de L ₃ y L ₄ (nódulos de plagioclasas alargadas y orientación de anfíboles).

Corrosión y transformación de granates y piroxeno en: anfíbol, epidota, plagioclasa y titanita. Se produce, bajo condiciones metamórficas de grado medio y probablemente también de grano alto (Presión media) con diferenciados leucocratos, el bandeo que actualmente se observa, más o menos plegado, en las rocas.

Se diferencian bandas con:

Anfíbol + Plag. (y restos de pirox. y granate)

Pistac. + Plagioclasa + Apatito + Titan. + Anfíbol y restos de granate y piroxeno).

F = Fase de deformación. S = Esquistosidad correspondiente. Cj = "Close jointing"

* La única zonación compatible con la de los anfíboles es la normal. Por esta razón, de la zonación total de las plagioclasas, obtenidas a base de las medidas en cada lámina, sólo cabe incluir en esta fase la zonación normal, la cual puede representar la continuación de la zonación ya iniciada en la fase anterior de metamorfismo.

*** En las muestras con anfíbol titanífera la zonación inversa afecta a plag.mucho más cálcicas: An₆₀₋₆₂→An₆₇; An₇₅→An₈₀. Esto se debe a que el Na se alberga en la red del anfíbol.

METAMORF. POST F₄ - F₃

FENOBLASTOS Y CRIS. PEQUEÑOS DE:

CUMMINGT. Fe → TSCHERM.

TSCHERM. Ti → TSCHERM.

Zonación normal, solo compatible con la de las plag. tardías de las venas. Fenoblastos con desmezcla de rut. e ilmenita.

RUTILO xenomorfo, MENA Ti, CIRCON CUARZO (de las venas crenuladas).

PLAG.: 1ª generación: en venas (***) y en la matriz de todas las láminas Oligoclasa Ca → Andesina

An₂₅₋₂₈ → An₃₀₋₃₂ → An₃₅₋₃₆ → An₄₀

→ An₄₂₋₄₅ (***)

2ª generación en venas con zonación normal:

Oligoclasa → Albita (**) (An₄₂₋₄₅) →

→ An₂₀₋₁₉ → An₁₇₋₁₆ → An₁₃₋₄

Metamorfismo probablemente de grado alto y presión media (anatexia) con diferenciación de venas leucocratas y de anfíboles desorientados en las paredes y en la matriz de la roca.

PLIEGUES SUAVES POST-ESQUITOSOS. CRENULACION DE VENAS DE CUARZO

CLOSE JOINTING

Relleno de CLINOZOIS. + CUARZO

Alteración de plag. a clinozois. en proximidad al Cj.

Probablemente también, fracturas con CUMMINGT. acicular + CLINOZOIS + CUARZO (que puede dar simplectitas con epidota).

Trasformación de la scherm. de las paredes de estas fracturas en cummingt. y de las plag. próximas a clinozois.

FRACTURACION TARDIA NO LIGADA A Cj.

ALTERACIONES:

Anfíboles alterados y meteorizados.

Gran. y pirox. → TSCHERM. -PARGAS. + clorita + 0Fe

Granate corroído por cuarzo y + cloritizado.

Granate → CLINOZOIS.

Plag. → SERIC. + CLINOZOIS. y/o PISTAC.

Plag. tectonizada y albitizada PARAGENESIS EN FRACTURAS (o intersticiales pero ligadas a fracturas):

CLINOZOIS. y/o PISTAC. + 0x. Fe.

CLOR. + SERIC. + 0x. Fe

CUARZO + ALB. + CLOR. + SULFUROS

+ EPIDOTA

Condiciones de metamorfismo bajo (o muy bajo?) o de tipo hidrotermal (hidrotermalismo más o menos ligado a metamorfismo).

*** En las venas tardías se han medido plagioclasas con dos zonaciones distintas: a) An₂₇₋₂₃ → An₃₀₋₃₁ → An₃₅₋₃₆ → An₃₈₋₄₂, que es casi exactamente la misma zonación que la general observada en todas las láminas y que es la reflejada en la 5ª columna. Por esta coincidencia, pensamos que las plagioclasas, cuando ya existían, han modificado sucesivamente su composición, de modo que la actual corresponde casi por entero a esta última fase; b) Zonación normal en plagioclasas más tardías: An₂₀₋₁₉ → An₁₇₋₁₆ → An₁₃₋₄. La corrosión (→) y la plagioclasa más albitica pueden deberse a procesos tardíos de tectonización.

TABLA I.- Cuadro resumen del estudio petrológico de las metabasitas.

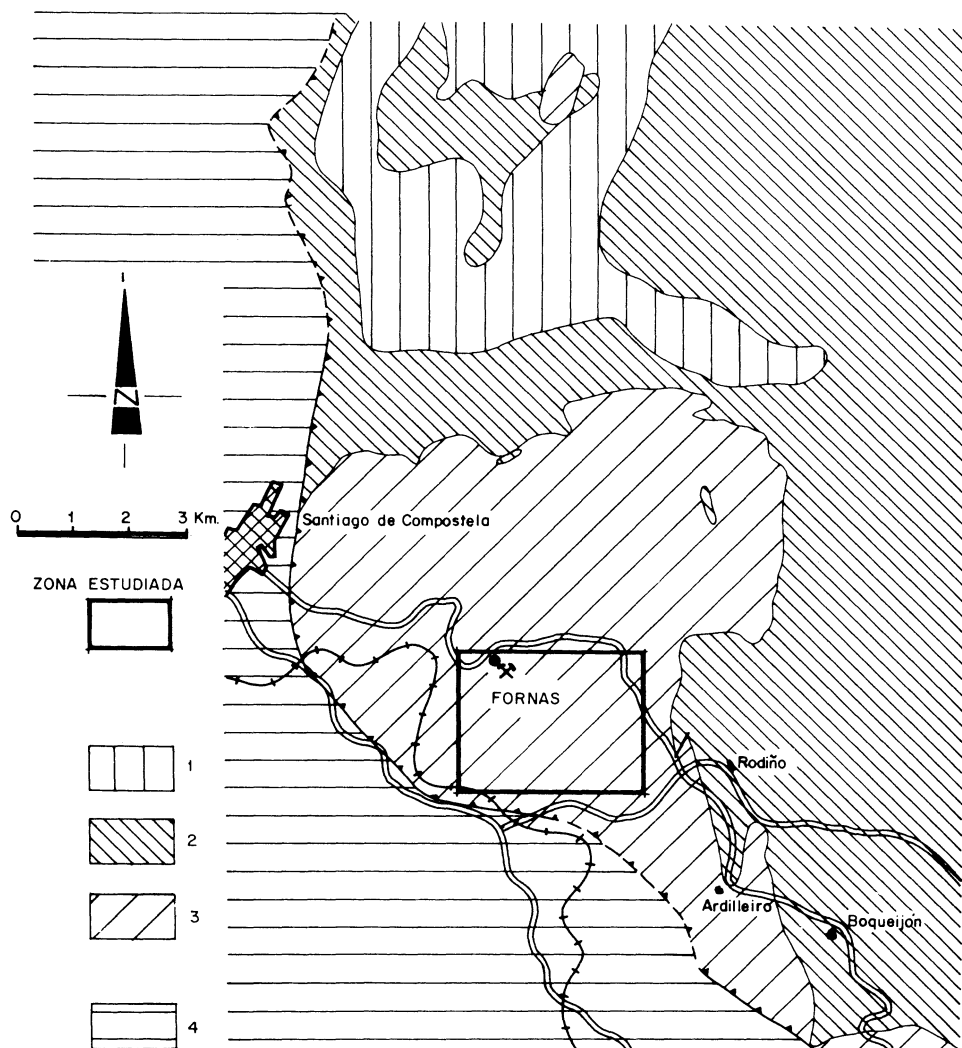


Figura 1. Localización del área estudiada. Esquema simplificado, basado en VAN ZUUREN (1969)
 Complejo de Ordenes : 1 Migmatitas ; 2 Paragneises y esquistos ; 3 Metabasitas.
 Complejo de Santiago : 4 Indiferenciado.

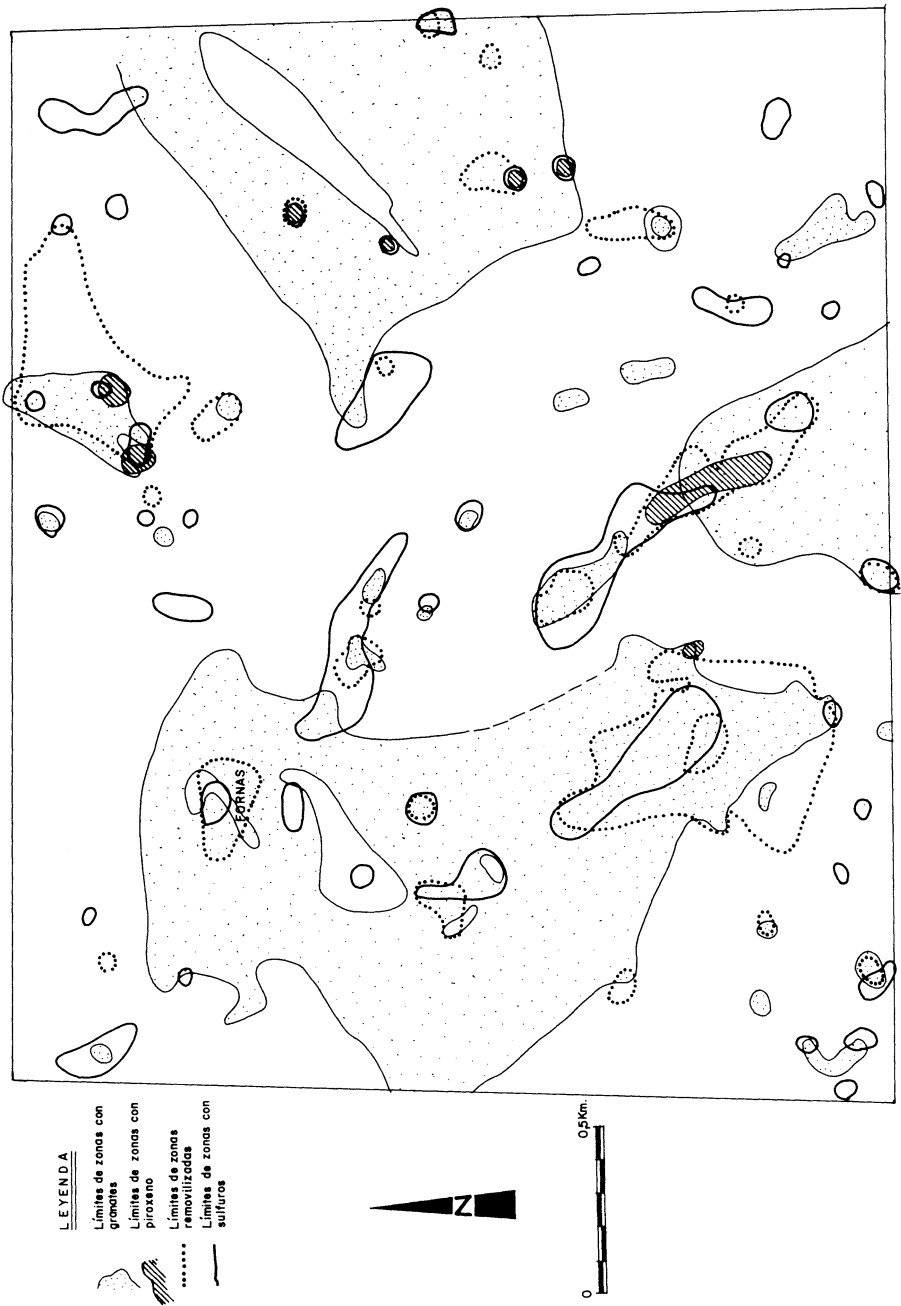


Figura 2 MAPA LITOLÓGICO Y DE INDICIOS

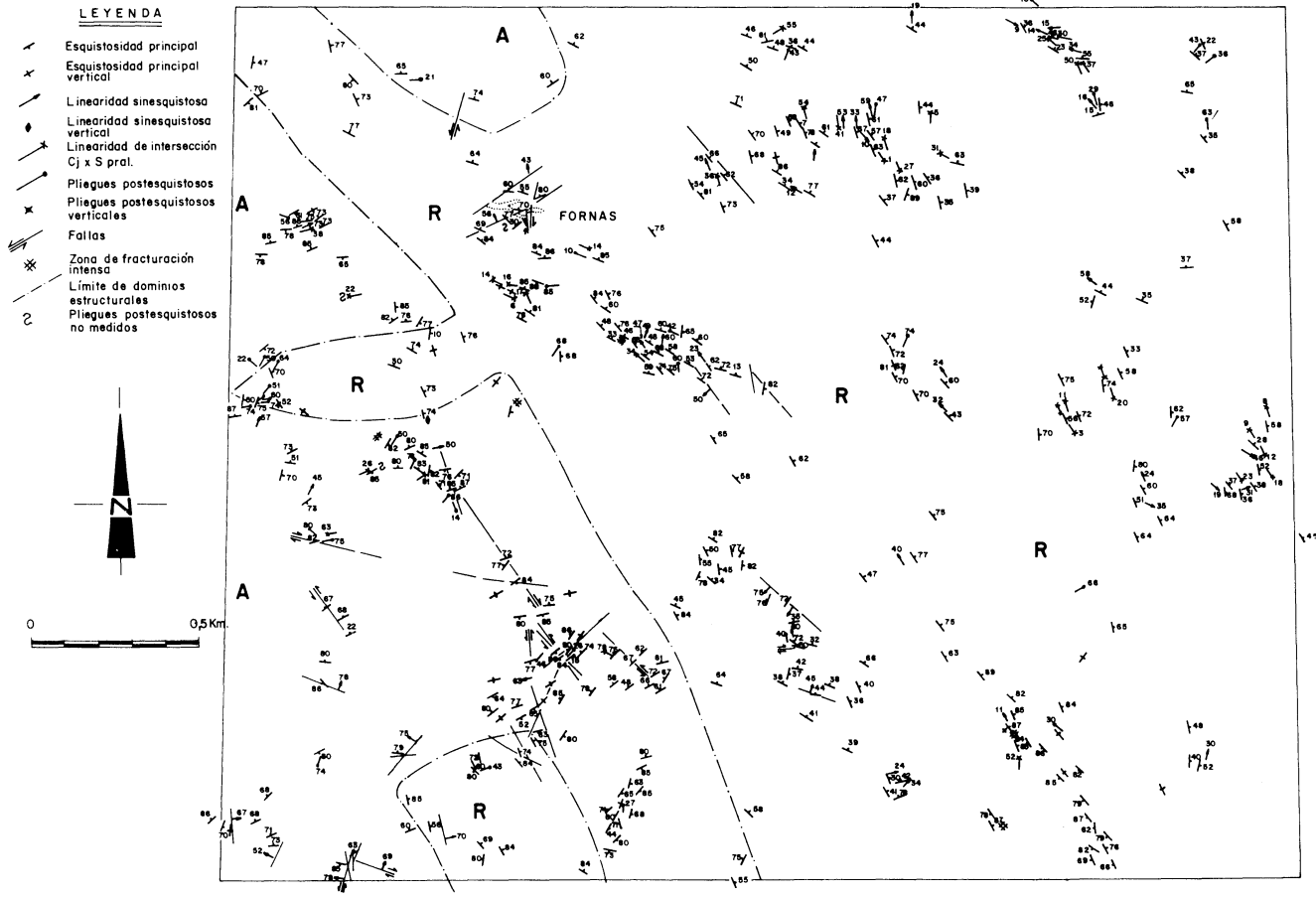
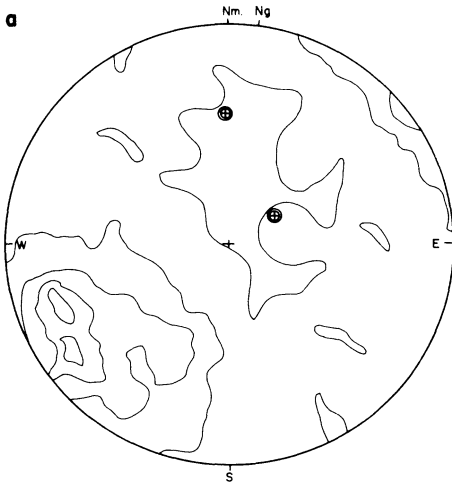
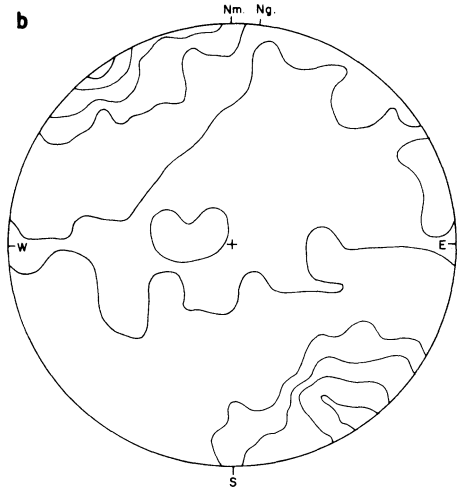


Figura 3 MAPA ESTRUCTURAL

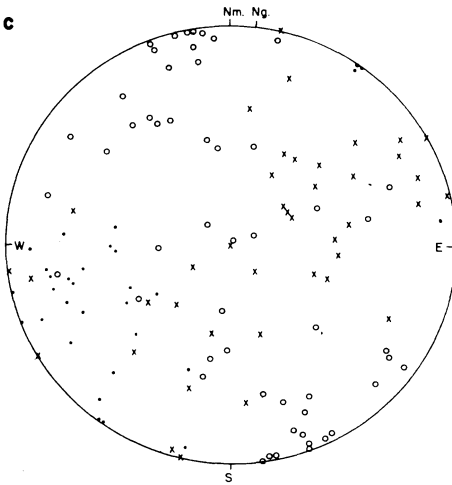
FIGURA 4



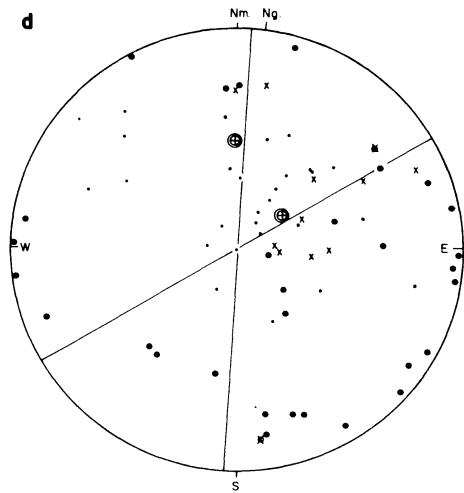
Esquistosidad principal S_4 en dominios R 670 polos
Contornos de 0, 10, 20, 30 y 40 %



Esquistosidad principal S_4 en dominios A 297 polos
Contornos de 0, 6, 11, 18 y 26 %



- x "Close jointing" (Cj)
- S_4 en zonas en que aparece Cj
- o Intersecciones $S_4 \times Cj$



- x Eje medido
- Sup. de simetría
- * Crenulación
- Eje deducido
- ⊗ Ejes de pliegues postesquistosos deducidos de 4a y b

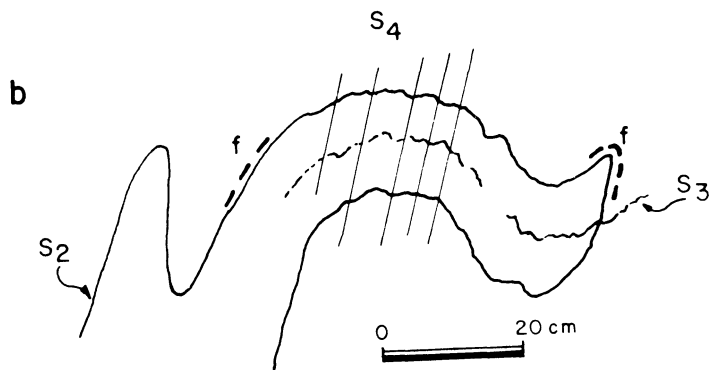
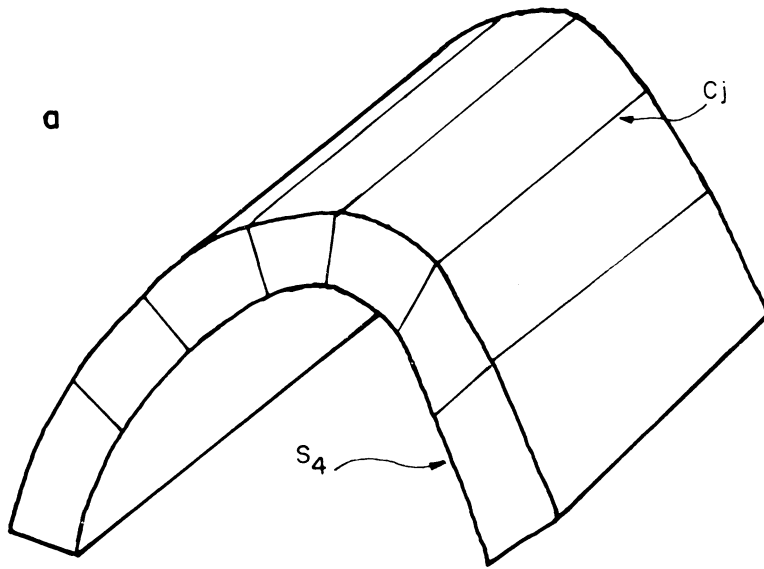
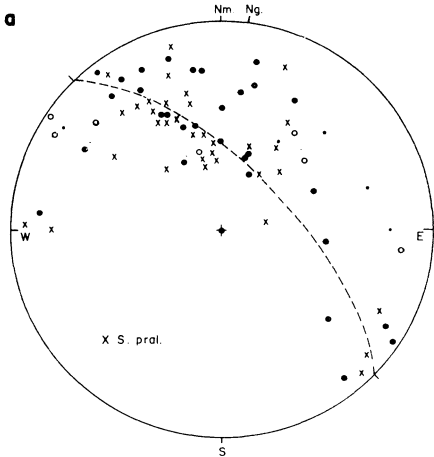


Figura 5

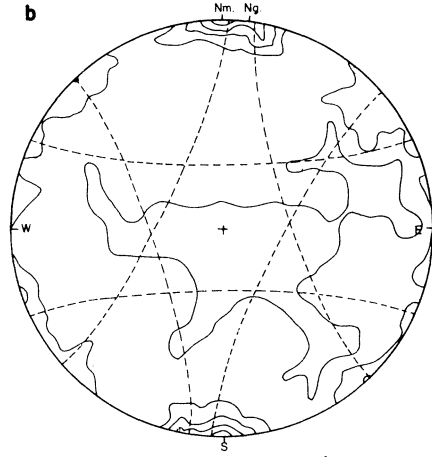
a Pliegues post - S_4

b Interferencia de pliegues en Fornás: f = Feldespatos aplastados

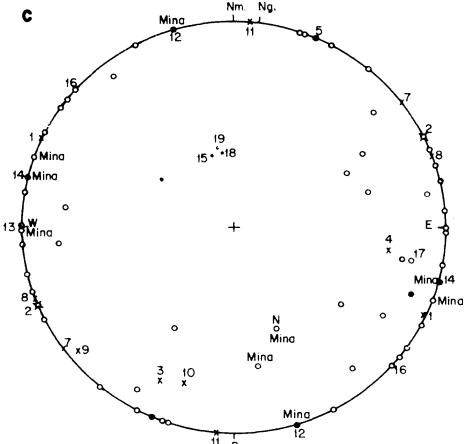
FIGURA 6



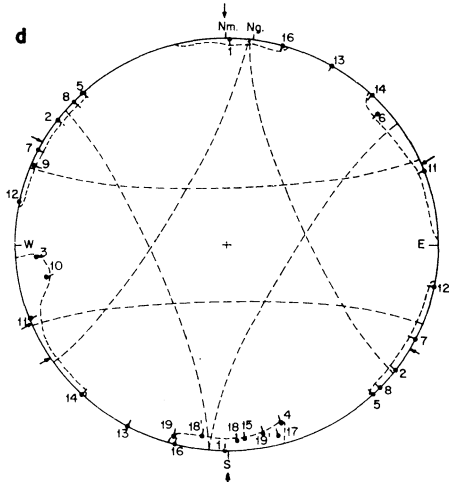
- x Eje medido
 - Linealidad de orientación
 - Eje deducido
 - o Linealidad de crenulación
- Estructuras menores
sinesquistosas 78 polos



Diacloras (246 medidas) contornos de 0, 2, 4, 6 y 8%
Esfuerzos deducidos 1º N. 115 E.; 2º N-S; 3º N. 73 E.
(Respecto al N. mag.)



- Dextrorsas
 - x Sinistrorsas
 - o Indiferenciadas
 - Microfallas
- Fallas (51 medidas)



Esfuerzos deducidos para las fallas: 1º N 121 E.;
2º N-S; 3º N 68 E (respecto al N. mag.)

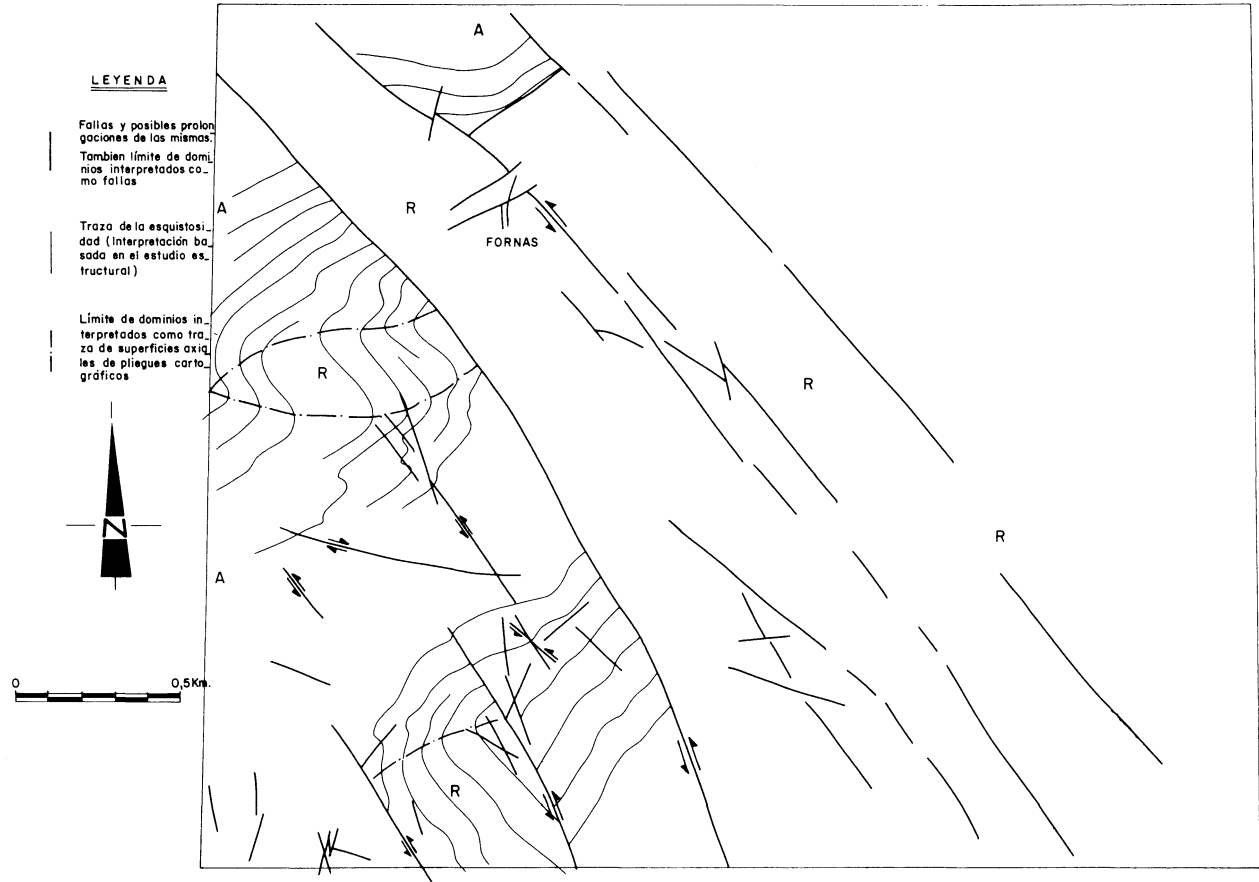


Figura 7 INTERPRETACION DEL MAPA ESTRUCTURAL

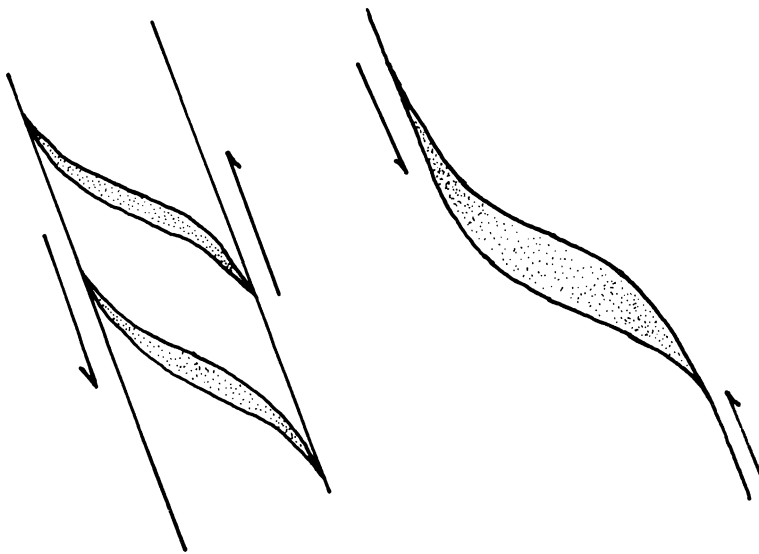


Figura 8 Explicación en el texto

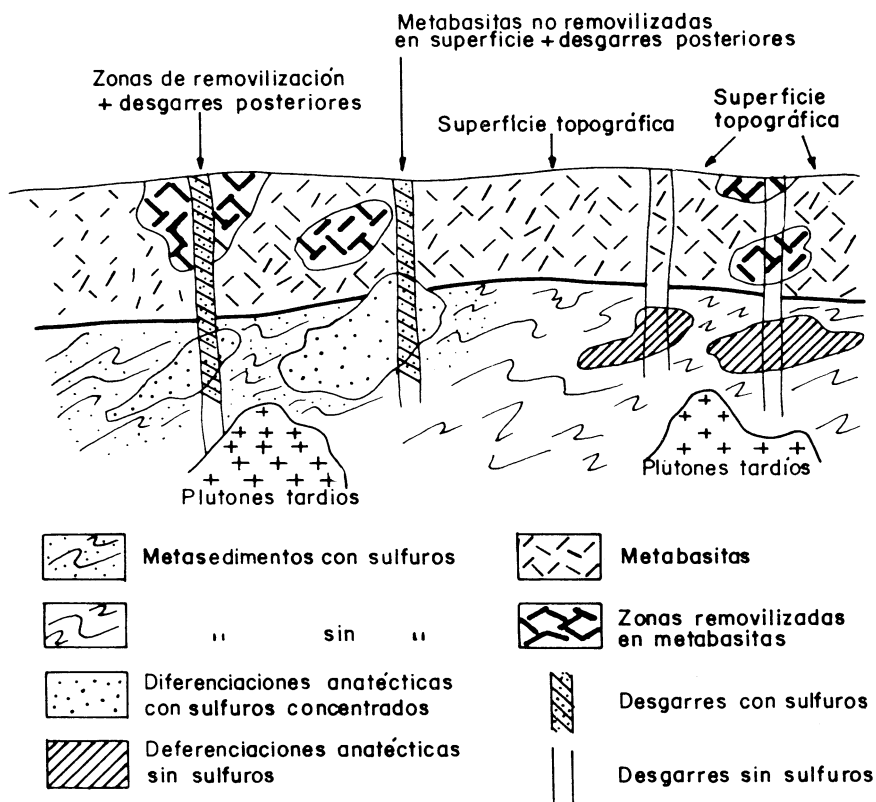


Figura 9 Esquema ideal interpretativo de la génesis del yacimiento (ver texto)