

## RELACIONES ENTRE LA ZONALIDAD PETROLOGICA Y METALOGENICA DE LOS MACIZOS LERZOLITICOS DE LAS CADENAS ALPINAS DEL MEDITERRANEO OCCIDENTAL (CORDILLERA BETICO-RIFEÑA Y KABYLAS)

F. Gervilla\*, M. Leblanc\*\* y J. Torres-Ruiz\*

### RESUMEN

En los macizos lertzolíticos de la Serranía de Ronda, de Beni Bousera y de Collo se han identificado facies de lertzolitas con granate, facies de lertzolitas con espinela (subfacies Ariegita y Seiland) y facies de lertzolitas con plagioclasa. Estas facies petrológicas se distribuyen de forma que las lertzolitas con granate se sitúan en contacto con la unidad metapelítica suprayacente, mientras que las lertzolitas con espinela y con plagioclasa lo hacen en posiciones progresivamente más alejadas, representando zonas cada vez más internas en el primitivo cuerpo ultramáfico.

Los diferentes indicios de mineralización pueden dividirse en dos grupos: uno compuesto esencialmente por cromita y arseniuros de níquel con ganga de piroxenos y/o cordierita, y el otro constituido por sulfuros de Fe-Ni-Cu con grafito y con piroxenos, plagioclasa y flogopita como minerales de la ganga. En ambos grupos las mineralizaciones de composición más refractaria son las primeras en cristalizar y lo hacen en las etapas más tempranas en las zonas más internas del diapiro, mientras que las de composición más diferenciada lo hacen más tarde en posiciones más periféricas.

La fuerte interrelación entre la zonación petrológica y metalogénica apoya una génesis para las mineralizaciones íntimamente asociada a la evolución petrológica de los diapiros del manto. Los líquidos mineralizantes derivan de magmas generados mediante la fusión parcial de las peridotitas y habrían migrado hacia la periferia sufriendo un complejo proceso de fraccionación e interacción con las rocas encajantes, en condiciones de presión moderadas a bajas.

**Palabras clave:** *Macizos lertzolíticos, cromita, arseniuros de níquel, sulfuros (Fe-Ni-Cu), grafito.*

### ABSTRACT

Garnet-lherzolite facies, Ariegite and Seiland subfacies of the spinel-lherzolite facies and plagioclase-lherzolite facies have been identified in the Serranía de Ronda, Beni Bousera and Collo lherzolitic massifs. These petrological facies occur in a zonal arrangement: garnet lherzolite are in contact with the overlying metapelitic sequence and spinel then plagioclase lherzolite occur inwards, representing the innermost zones in the former mantle body.

The various occurrences of mineralizations can be classified in two main groups: one of them is essentially made up of chromite and Ni arsenides with pyroxene and/or cordierite as gangue minerals; the other consists of Fe-Ni-Cu sulfides and graphite, with pyroxene, plagioclase and phlogopite as gangue minerals. In both groups, the ores with the more refractory composition were the first to crystallize in the hotter core of the diapir while those other with a more differentiated composition were formed later within the external zones.

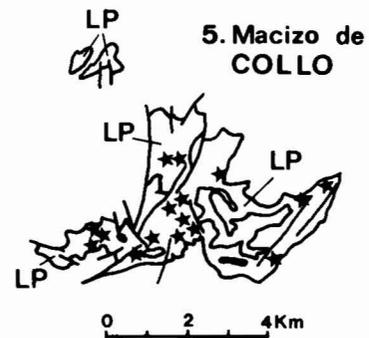
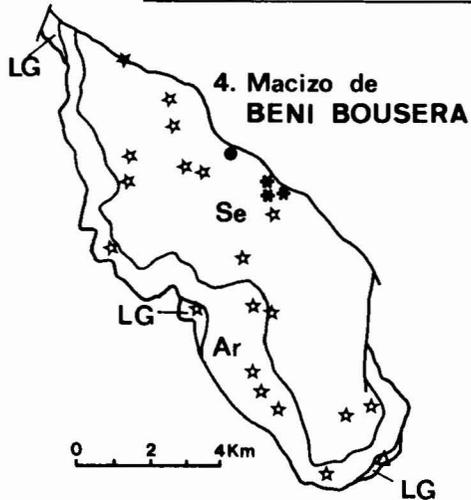
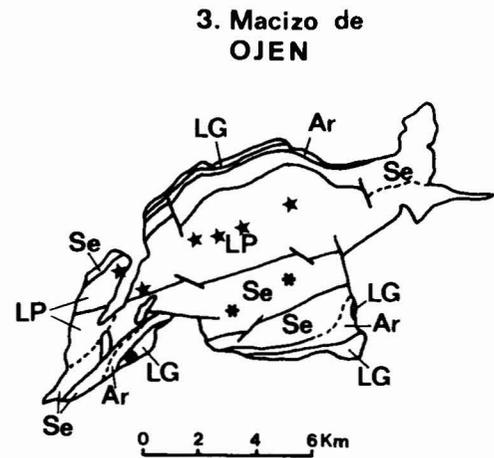
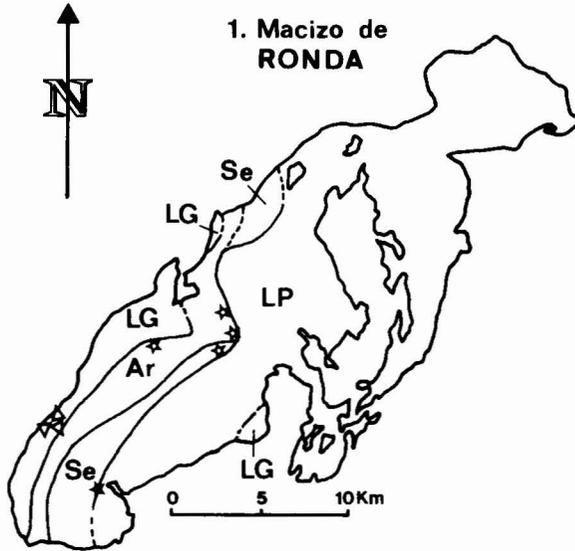
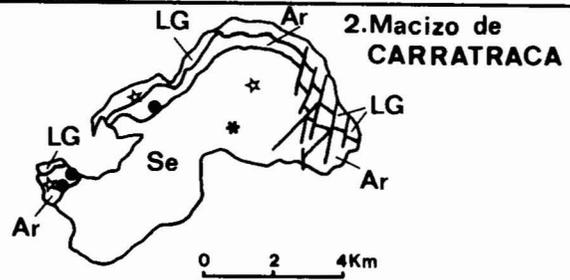
The close correlation between petrological and metallogenical zoning supports a magmatic origin of the mineralizations related to the petrologic evolution of the mantle bodies. The mineralizing liquids originated from magmas generated by partial melting of the peridotites. The former migrated outwards, from the internal part of the bodies, during which marked interaction with the enclosing rocks and complex fractionation processes took place under moderate to low pressure conditions.

**Key words:** *Lherzolitic massifs, chromite, Nickel arsenides (Fe-Ni-Cu) sulfides, graphite.*

\* Departamento de Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 18002 Granada.

\*\* Centre Geologique et Geophysique. C.N.R.S. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Place Eugène Bataillon. 34060 Montpellier. Francia.

ZONALIDAD PETROLOGICA Y METALOGENICA DE LOS MACIZOS LERZOLITICOS DEL MEDITERRANEO OCCIDENTAL.



## Introducción

Dentro de las Zonas Internas del Orógeno Alpino, a ambos lados del Arco de Gibraltar (Cordillera Bético-Rifeña) y en la Pequeña Kabylia (Argelia), afloran un conjunto de macizos ultramáficos de «tipo alpino», los cuales están esencialmente constituidos por lertzolitas con menores proporciones de harzburgitas, dunitas, capas de piroxenitas y diques leucocráticos. Estos macizos son los de Ronda, Ojén y Carratraca en la Cordillera Bética: Beni Bousera en el Rif y Collo (1) en la pequeña Kabylia. Excepto en este último macizo, las rocas ultramáficas muestran una zonación de facies minerales más o menos completa. Tales macizos han sido interpretados como porciones del manto superior emplazados en la corteza continental durante la Orogenia Alpina, mediante procesos de cizalla en una zona de falla transformante (Lundeen, 1978; Kornprobst y Vialzeuf, 1984; Tubía, 1984, 1985 a y b; Tubía y Cuevas, 1986), o en un protorif (Misseri, 1987).

Desde el punto de vista metalogénico estos macizos lertzolíticos se caracterizan por presentar dos grupos de mineralizaciones peculiares. Uno está compuesto esencialmente por cromita y arseniuros de níquel, con ganga de piroxeno y/o cordierita (Agard *et al.*, 1959; Oen, 1973; Oen *et al.*, 1971; 1973, 1979, 1980; Leblanc, 1986; Gervilla *et al.*, 1987) y presenta contenidos significativamente importantes de oro y elementos del grupo del platino (Leblanc y Johan, 1986; Leblanc y Gervilla, 1988). El otro tipo incluye mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu y/o de grafito, con pequeñas cantidades de cromita, trazas de arseniuros de Ni y sulfoarseniuros de Ni y/o Co y ganga de piroxenos, plagioclasa y/o flogopita. Dentro de cada uno de estos grupos se pueden distinguir diversos tipos de mineralizaciones en base a criterios esencialmente composicionales.

Gervilla *et al.* (1987), señalan que los diferentes tipos de mineralizaciones de cromita-arseniuros de Ni de los macizos ultramáficos de la Serranía de Ronda muestran un patrón de distribución espacial relacionado con el que rige la distribución de las facies minerales de las rocas encajantes. En este trabajo se pone de manifiesto que este hecho es generalizable a todos los tipos de mineralizaciones y extensible a los demás macizos considerados. Se subraya, por tanto, una estrecha correlación entre la zonación petrológica

y metalogénica de dichos macizos y se discuten sus implicaciones genéticas.

## Zonalidad petrológica de los macizos lertzolíticos

En el conjunto de los macizos lertzolíticos se identifican los cuatro tipos de facies minerales definidos por O'Hara (1967) para las rocas ultrabásicas (fig. 1). Estas rocas muestran diferentes texturas y variables grados de deformación: 1) Lertzolitas (dunitas) (2) con granate (3) con textura milonítica; 2) lertzolitas (harzburgitas) (2) con espinela, de subfacies Ariegita, con textura porfiroclástica; 3) lertzolitas con espinela, de subfacies Seiland, con textura protogranular; 4) lertzolitas con plagioclasa, con una foliación penetrativa.

Sólo los macizos de Ronda y de Ojén muestran una zonación completa de facies minerales. En los macizos de Carratraca y de Beni Bousera sólo existen lertzolitas con granate y lertzolitas con espinela, mientras que el macizo de Collo está compuesto exclusivamente por lertzolitas con plagioclasa (fig. 1). Esta distinta representación de facies en los diversos macizos está condicionada por la oblicuidad de las superficies de cizalla, responsables del emplazamiento cortical de las peridotitas respecto a los contactos entre facies minerales, por la propia estructura interna de cada uno de los macizos y por el diverso nivel de exposición de los mismos.

La distribución espacial de facies minerales en los macizos de la Cordillera Bético-Rifeña reflejan un patrón zonal respecto a los límites de los cuerpos ultramáficos. En cada caso, desde el contacto con los materiales corticales suprayacentes aparecen lertzolitas con granate, lertzolitas con espinela de subfacies Ariegita, lertzolitas con espinela de subfacies Seiland y lertzolitas con plagioclasa, en posiciones progresivamente más alejadas (Obata, 1980; Reuber *et al.*, 1982).

Los distintos tipos de piroxenitas incluidos en las rocas ultramáficas también muestran un patrón de distribución zonal, relacionado con el de las facies de las lertzolitas encajantes. Según esta distribución existen websteritas con plagioclasa dentro de lertzolitas con

(2) Facies diferenciadas por Kornprobst (1969) en Beni Bousera.

(3) La individualización de las facies de lertzolitas con granate está sujeta a una gran controversia (Schubert, 1982; Obata, 1982), ya que, aunque fueron descritas en Ronda por Obata (1980), tanto Kornprobst (1969), en Beni Bousera, como Schubert (1977), en Ronda, estiman que el granate no está en equilibrio con la peridotita, sino que procede de la trituración mecánica de las capas de clinopiroxenita con granate del entorno.

(1) Este macizo también se ha denominado en la literatura macizo de Cap Bougaroun (Bouillin y Kornprobst, 1974).

Fig. 1.—Esquema de situación: a) Zonas Internas; b) Zonas Externas. Facies: LG: Lertzolitas con granate. Ar: Subfacies Ariegita de las facies de lertzolitas con espinela. Se: Subfacies Seiland de las facies de lertzolitas con espinela. LP: Lertzolitas con plagioclasa. Los mapas de distribución de facies de los macizos de Ronda y Beni Bousera proceden de Obata (1980) y Reuber *et al.* (1982). Mineralizaciones: \*: Mineralizaciones de cromita-piroxenos. \*: Mineralizaciones de cromita-ortopiroxeno con niquelina. ●: Mineralizaciones de cromita-niquelina con ortopiroxeno y/o cordierita. \*: Mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu con grafito y trazas de cromita. Δ: Mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu sin grafito ni cromita.

Tabla 1.—Distribución de las principales asociaciones minerales de cada uno de los tipos de mineralización en función de las facies minerales de las lertzolitas encajantes

Facies Petroológicas	Serranía de Ronda (Cord. Bética)		Beni Bousera (Rif)		Collo (Pequeña Kabylia)	
	Mineralizaciones		Mineralizaciones		Mineralizaciones	
	Cromita+Ars. Ni	Sulfuros Fe-Ni-Cu + Grafito	Cromita+Ars. Ni	Sulfuros Fe-Ni-Cu + Grafito	Cromita+Ars. Ni	Sulfuros Fe-Ni-Cu + Grafito
Lertzolitas con Granate	Chr+Nc+Opx/Chr+Nc+Cd <sup>(1)</sup>	Sulf <sup>(5)</sup> Sulf+Gr+Chr <sup>(1)</sup> Sulf+Gr+Chr <sup>(1)</sup>		Sulf Sulf+Gr+Chr <sup>(2)</sup> Sulf+Gr+Chr <sup>(8)</sup>		
Lertzolitas con Espinela (Ariegita)	Chr+Nc+Opx/Chr+Nc+Cd <sup>(4)</sup>	Sulf+Gr+Chr <sup>(2)</sup> Gr+Chr+(Sulf) <sup>(1)</sup>	Chr+Nc+Opx/Chr+Nc+Cd <sup>(1)</sup>	Sulf+Gr+Chr <sup>(6)</sup>		
Lertzolitas con Espinela (Seiland)	Chr+(Nc)+Opx <sup>(1)</sup> Chr+Opx <sup>(2)</sup> Chr+Opx <sup>(1)</sup>	Sulf+Gr+Chr <sup>(2)</sup>	Chr+Nc+Opx <sup>(4)</sup>	Gr+Sulf+Chr <sup>(2)</sup>		
Lertzolitas con Plagioclasa	Chr+Opx <sup>(1)</sup> (en Dunitas) Chr+Px <sup>(7)</sup> (en Dunitas)				Chr+Px <sup>(18)</sup> (en Dunitas)	

Chr=Cromita. Nc=Niquelina. Opx=Ortopiroxeno. Cd=Cordierita. Px=Piroxenos. Sulf=Sulfuros Fe-Ni-Cu. Gr=Grafito. Entre paréntesis se indica el número de indicios.

plagioclasa, mientras que hacia las lertzolitas con granate y con un cierto grado de solape aparecen progresivamente websteritas y clinopiroxenitas con espinela y websteritas y clinopiroxenitas con granate.

### Zonación metalogénica

Se pueden individualizar dos grupos principales de mineralizaciones, cuyas características evolucionan dentro del esquema general de facies petrológicas de las rocas encajantes (tabla 1).

#### Mineralizaciones de Cromita y Arseniuros de Ni

Están enclavadas en los cuatro tipos de facies minerales de las lertzolitas, si bien de unas zonas a otras muestran diferencias tanto en aspectos geométricos como composicionales.

En las lertzolitas con plagioclasa se presentan como cuerpos podiformes de cromita y como venas más o menos irregulares. En ambos casos muestran una envolvente dunitica y están alineados paralelamente a la foliación de las peridotitas encajantes. Su extensión lateral más frecuente suele estar comprendida entre 1 y 30 metros y sus espesores son en general inferiores a 50 cm. El cuerpo más grande se ha observado en el macizo de Collo, con una dimensiones de 10×2×5 metros. La cromita es rica en Cr y Mg (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=35-57%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=16-37%; MgO=9-16%; FeO=12-

21% en peso) y tiene escasos contenidos en Zn y V (ZnO=0,37%; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0,13-0,41 en peso). Su campo posicional y su evolución es similar a la de los depósitos de cromita en complejos ofiolíticos (fig. 2). La ganga está compuesta de enstatita (En<sub>95-84</sub> con un porcentaje en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inferior al 2%) y/o de diópsido cromífero (con porcentajes de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,8 y 4,3%, de CaO entre 21 y 23% y de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,59 y 1,5%). En las mineralizaciones de la Serranía de Ronda aparecen también trazas de sulfuros y arseniuros de níquel: pentlandita y mucherita principalmente.

En las lertzolitas con espinela y en las lertzolitas con granate, los cuerpos minerales se presentan como filones o «capas» dispuestas: bien concordantes, bien discordantes respecto a la foliación de las peridotitas y con contactos netos. Su extensión lateral y espesor más frecuentes oscilan entre 20-30 m y 0,5-1,5 m, respectivamente. Las menas están constituidas por cromita y arseniuros de níquel intergranulares (niquelina y en menor medida lollingita), representando los arseniuros entre el 5 y 40% del total. La ganga está constituida por broncita (En<sub>80-69</sub> con contenidos en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 2 y 4%) y cordierita magnésica (MgO/MgO+FeO=0,83-0,91) con aparición puntual de clinopiroxeno tipo augita. La cromita es rica en Al y Fe (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=20-44%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=20-40%; FeO=21-31%; MgO=5-10% en peso) y tiene contenidos en Zn y V inusualmente altos (ZnO=0-1,5%; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0,75-2,6% en peso). Desde las cromitas de las mineralizaciones encajadas en lertzolitas con espinela (subfacies Seiland), hasta las enclavadas en lertzolitas con granate,

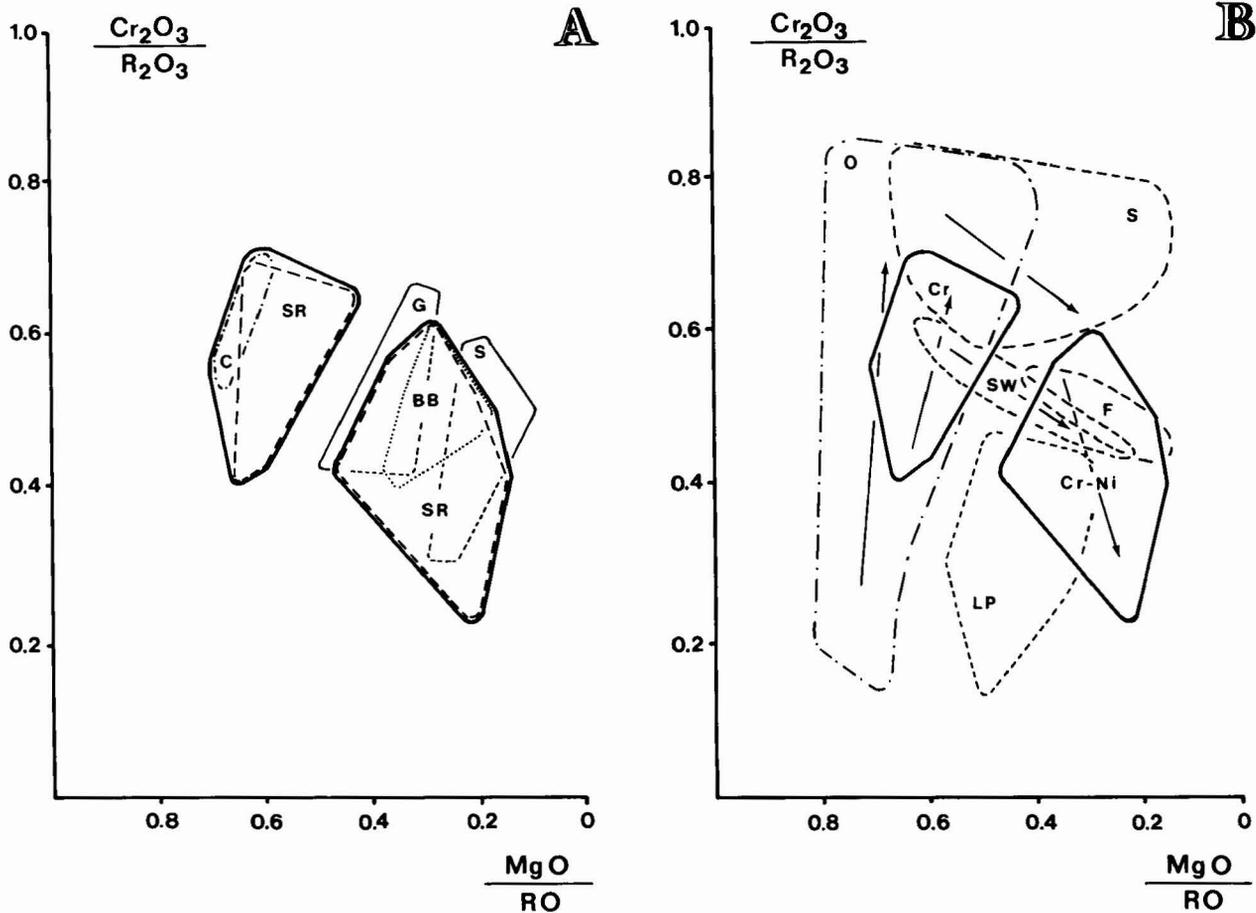


Fig. 2.—Diagramas de composición de las cromitas de los distintos tipos de mineralizaciones:

$$R_2O_3 = Cr_2O_3 + Al_2O_3 + V_2O_5 + Fe_2O_3 + TiO_2$$

$$RO = MgO + FeO + ZnO + MnO$$

A) Campos composicionales de las mineralizaciones de cromita con piroxenos enclavadas en lertzolitas con plagioclasa (Cr) y de las mineralizaciones de cromita y niquelina con ortopiroxeno y/o cordierita enclavadas en lertzolitas con espinela y con granate (Cr-Ni): SR: Serranía de Ronda. C: Collo. BB: Beni Bousera. Mineralizaciones de sulfuros y/o grafito. G: Cromitas en mineralizaciones con grafito dominante. S: Cromitas en mineralizaciones con sulfuros dominantes.—B) Comparación de los campos composicionales de las cromitas de las mineralizaciones de Cr- y Cr-Ni con los de las cromitas de otros depósitos a escala mundial: O: Complejos ofiolíticos (la flecha indica la evolución hacia términos más refractarios) (Leblanc, 1985); S: Complejos magmáticos estratiformes básicos y ultrabásicos (Irvine, 1967); SW: Complejo anortosítico de Stillwater (Jackson, 1969). Complejo anortosítico de Fiskenaeset (Ghisler, 1976). LP: Complejo gabroico de La Perouse (Czamanske *et al.*, 1976) (las flechas indican las tendencias de evolución magmática).

se observa una tendencia composicional similar a la que muestran los depósitos de cromita asociados a complejos estratiformes máficos-ultramáficos. En este mismo sentido, es decir, desde las facies más internas hacia las más externas, aumentan el contenido en arseniuros de níquel y, con él, el de Au y elementos del grupo del platino (Leblanc y Gervilla, 1988) junto con un aumento en la proporción de cordierita y la aparición de óxidos de Ti (rutilo e ilmenita).

*Mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu y/o grafito*

Están enclavadas exclusivamente en lertzolitas con

espinela y en lertzolitas con granate. Se presentan como venas irregulares en relación con zonas de fractura, con contactos netos y discordantes respecto a la foliación de las peridotitas. Con frecuencia contienen xenolitos lenticulares de roca de caja. Las dimensiones son muy variables, desde venas individuales de escala centimétrica a zonas de varias decenas de metros de corrida y espesor de hasta 7 metros.

La asociación mineral está constituida esencialmente por pirrotina, pentlandita, calcopirita, cubanita, grafito, cromita y por pequeñas cantidades de arseniuros y sulfoarseniuros de níquel y/o cobalto (niquelina, maucherita, gersdorffita y cobaltina). La ganga está compuesta por piroxenos, plagioclasa (An<sub>70-80</sub>) y/o flogo-

pita. En la mayor parte de los casos, las mineralizaciones están muy alteradas, dando masas terrosas de oxihidróxidos de hierro con concentraciones nodulares de grafito.

Se pueden establecer distintos tipos composicionales en base a las proporciones relativas entre grafito y sulfuros, entre los diferentes sulfuros, y a la existencia y composición de la espinela cromífera (tabla 1). En las mineralizaciones más ricas en grafito la asociación de sulfuros está constituida esencialmente por pirrotina y pentlandita. La cromita presenta contenidos elevados en Mg y Cr, y está empobrecida en elementos minoritarios ( $\text{Cr}_2\text{O}_3=36-51\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3=17-32\%$ ;  $\text{MgO}=6-10\%$ ;  $\text{FeO}=18-26\%$ ;  $\text{ZnO}=0,4-1,0\%$ ;  $\text{V}_2\text{O}_3=0,3-1,1\%$  en peso). Puntualmente, alguna de estas mineralizaciones contienen ganga de olivino. Cuando predominan los sulfuros aumenta la proporción de calcopirita-cubanita, y la cromita contiene mayores cantidades de Fe, Al y, sobre todo, de Zn y V ( $\text{Cr}_2\text{O}_3=26-47\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3=20-39\%$ ;  $\text{MgO}=2-6\%$ ;  $\text{FeO}=27-31\%$ ;  $\text{ZnO}=0,8-1,6\%$ ;  $\text{V}_2\text{O}_3=1,0-3,1\%$  en peso). Esta tendencia composicional de las cromitas indica una fraccionación magmática progresiva (Henderson, 1975; Irvine, 1976). Localmente, en las facies más externas de los macizos ultramáficos se encuentran mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu con una razón calcopirita + cubanita/pirrotina + pentlandita muy alta, con esferita, sin grafito ni cromita, y que muestran una alteración hidrotermal de la roca de caja.

Estas variaciones composicionales se observan de forma más o menos regular desde las mineralizaciones encajadas en peridotitas de las subfacies Seiland de las lertzolitas con espinela a las encajadas en lertzolitas con granate. A pequeña escala se pueden reconocer tendencias similares desde los hastiales hacia el centro de cuerpos minerales individuales, con la salvedad de que en el centro de los filones la cromita muestra un fuerte enriquecimiento en Cr debido a la extracción del Al del medio durante la cristalización de plagioclasa y/o mica.

## Discusión

La estricta relación espacial de las mineralizaciones con las rocas ultrabásicas, y el que su evolución composicional se realice de acuerdo con la zonación petrológica interna de los macizos es un importante argumento que aboga por un origen endogenético de las mineralizaciones, asociado con la evolución intrínseca de los diapiros mantélicos.

### Zonalidad petrológica

La zonación de facies minerales de las peridotitas se desarrolla según un patrón de centro a periferia de los cuerpos ultramáficos debido a la conjugación de

procesos de fusión parcial en condiciones de alta presión (Frey *et al.*, 1985) y del proceso de enfriamiento dinámico subsiguiente durante su ascenso diapírico en el manto hasta la base de la corteza (Obata, 1980). La fusión parcial tuvo una intensidad variable (~5-30%), mayor en el núcleo que en los bordes del diapiro (Frey *et al.*, 1985). Los líquidos generados, de composición picrítica, migraron hacia las partes externas del cuerpo ultramáfico y sufrieron un complejo proceso de fraccionación cristal/líquido a alta presión, dando lugar a las capas máficas (Suen y Frey, 1987). De acuerdo con Obata (1980), el conjunto de peridotitas y piroxenitas se equilibró en unas condiciones de 1.100-1.200°C y 20-25 kb, tras lo cual sufrieron solamente recristalizaciones metamórficas subsólidas, últimas responsables de la formación de las lertzolitas con plagioclasa.

La generación de las lertzolitas con plagioclasa ha sido interpretada también como el resultado de la cristalización «in situ» de líquidos generados mediante una pequeña tasa de fusión parcial durante el ascenso diapírico (Boudier y Nicolás, 1972; Nicolás y Dupuy, 1984). Leblanc y Temagoult (1988) se inclinan por esta segunda hipótesis para explicar el origen de las lertzolitas con plagioclasa en el macizo de Collo, apoyándose en la ausencia de texturas de reacción entre plagioclasa-clinopiroxeno-espinela, y en la continuidad de moteados y lentes de plagioclasa paralelas a la foliación de las peridotitas, con venillas de plagioclasa oblicuas a dicha foliación. Estos autores indican que las facies con plagioclasa se equilibraron en unas condiciones de 900-950°C, por debajo de 9 kb. La existencia de estos mismos hechos en las lertzolitas con plagioclasa del macizo de Ojén principalmente, así como la presencia de venillas tardías de plagioclasa dentro de cuerpos duníticos, localmente con clinopiroxeno y espinela sin ningún signo de reacción, nos lleva a inclinarnos por un origen común para las lertzolitas con plagioclasa de los macizos ultrabásicos considerados, relacionado con la presencia de una pequeña proporción de líquido intergranular.

### Modelo metalogénico

Las mineralizaciones de cromita-arseniuros de níquel, y en especial la presencia de tales arseniuros, han sido interpretadas tanto de origen magmático (Oen, 1973), como relacionadas con la serpentización y autohidratación de los macizos ultramáficos (Rosso de Luna, 1955; I.G.M.E., 1987). El origen magmático de la cromita viene avalado por su asociación paragenética con piroxenos con texturas de acumulados. Localmente se observan acumulados de cristales prismáticos de ortopiroxeno con cromita y niquelina intercumulus, y con una zonación constituida por una abundancia creciente de inclusiones de estas menas hacia la periferia de los cristales de ortopiroxeno, que

en los bordes llega a confundirse con el material intercumulus. El origen de los arseniuros de níquel ha sido más cuestionado. No obstante, su estricta asociación con la cromita y los piroxenos, la presencia de abundantes inclusiones de arseniuros en dichos silicatos y óxidos tal y como se ha citado, así como el que muestren exsoluciones y composiciones inusuales indicativas de altas temperaturas de cristalización ( $\leq 800^{\circ}\text{C}$ , Oen *et al.*, 1971), abogan también por un origen magmático. De acuerdo con Oen (1973) y Oen *et al.*, (1979), las mineralizaciones de cromita-arseniuros de níquel se originaron a partir de un líquido óxido-arseniado producido por inmiscibilidad de un magma silicatado con distintos estados de diferenciación y/o contaminación. Con posterioridad, dicho líquido se separó en dos fracciones, una rica en cromita y otra rica en arseniuros de níquel.

Por lo que respecta a las mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu y grafito, su origen es más problemático. Sin embargo, su asociación con olivino, piroxenos y plagioclasa, la presencia de pequeñas cantidades de cromita, las similitudes químicas y mineralógicas con los depósitos de cromita-arseniuros de Ni, su análogo patrón de distribución espacial, y la comparación entre la composición química de ambos grupos de mineralizaciones (con un mayor contenido en volátiles y elementos como Na, Fe, Ti, V y Zn en las mineralizaciones de sulfuros) nos lleva a pensar en una posible relación genética entre los fluidos generadores de ambos grupos de mineralizaciones, representando las mineralizaciones de sulfuros con grafito una segregación magmática más tardía.

De acuerdo con los conocimientos actuales, cabe plantearse dos posibilidades para el origen de estos líquidos mineralizadores: que se trate de líquidos segregados de los fundidos generados por la primera fase de fusión parcial de las peridotitas y que producen las capas máficas (Frey *et al.*, 1985; Suen y Frey, 1987), o que se trate de líquidos generados durante una segunda etapa de fusión parcial en condiciones de presión moderada a baja, que afecte preferentemente a dichas capas máficas (Polvé, 1983).

Asumiendo la hipótesis del origen magmático y endogénico de los fluidos mineralizantes, los distintos tipos de mineralizaciones y su evolución composicional reflejarían distintas composiciones originales y/o diferentes estados de diferenciación de dichos fluidos mineralizantes. Esta evolución se realiza desde las zonas más internas a las más externas del diapiro peridotítico y, por tanto, de forma indirecta de acuerdo con el esquema de zonalidad petrológica de las rocas encajantes. Como consecuencia, desde las facies de lertzolitas con plagioclasa hasta las facies de lertzolitas con granate, los líquidos mineralizantes se irían enriqueciendo en FeO respecto a MgO (reflejado en la composición de ortopiroxenos y cromita), en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  (cristalizando cordierita y plagioclasa),

en  $\text{TiO}_2$  (cristalizando ilmenita y rutilo), en arseniuros de níquel y en elementos como Zn, V, Au y platinoídes. Esta evolución pone de manifiesto un proceso de fraccionación progresiva de los fundidos mineralizadores, junto con una fuerte interacción con las rocas encajantes especialmente con las capas máficas (sucesivos episodios de fusión-cristalización) durante su migración hacia las zonas más periféricas del diapiro ultramáfico. Igualmente, la cronología relativa de formación de las mineralizaciones es congruente con esta hipótesis:

- Las primeras mineralizaciones en formarse son las que presentan una composición más refractaria (mineralizaciones de cromita) y están enclavadas en la zona de más alta temperatura del diapiro (núcleo), actualmente con facies de lertzolitas con plagioclasa. Estas mineralizaciones presentan ortopiroxeno y clinopiroxeno como minerales de la ganga, lo cual está de acuerdo con una presión de cristalización superior a 10 kb, ya que por debajo de esta presión, durante la cristalización de líquidos basálticos, la fase principal en el liquidus es el olivino (Ringwood, 1975). Asimismo el uso de los geotermómetros de Well (1977) y Bertrand y Mercier (1986), en el par ortopiroxeno-clinopiroxeno, indica temperaturas de formación de  $1.120^{\circ}\text{C}$  (Leblanc y Temagout, 1988).
- Las mineralizaciones de cromita-arseniuros de níquel cristalizan a partir de líquidos más diferenciados cuyos primeros acumulados (en las subfacies Seiland de las lertzolitas con espinela) están compuestos por ortopiroxeno y cromita, con pequeños porcentajes de arseniuros de níquel. Esta paragénesis evoluciona hacia otras más ricas en arseniuros de níquel y progresivamente más ricas en sílice y alúmina con la formación de la asociación cordierita-cromita-arseniuros de níquel por debajo de 7-8 kb (límite máximo de estabilidad de la cordierita magnésica. Schreyer, 1985). Las temperaturas de formación son más ambiguas y han sido estimadas en  $\leq 1.500^{\circ}\text{C}$  para la cristalización del ortopiroxeno y entre  $1.300$  y  $950^{\circ}\text{C}$  para la de la cromita (Oen, 1973).
- Las mineralizaciones de sulfuros de Fe-Ni-Cu y grafito resultan de la cristalización fraccionada de un líquido sulfurado tardío, aunque relacionado genéticamente con el que dio lugar a las mineralizaciones de cromita-arseniuros de níquel. Esta fracción tuvo lugar durante el descenso de temperatura tras el emplazamiento cortical de las peridotitas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades dadas por M. Allal Tijani (B.R.P.M., Marruecos) y Targuisti Kamal (Facultad de

Ciencias, Tetuán) para visitar el macizo de Beni Bousera, así como la colaboración de M. Abdelkader Temagout (Université Sciences, Constantine, Algérie) en Collo. Asimismo agradecemos al doctor Torres-Roldán la revisión y crítica del manuscrito. Esta investigación ha sido financiada por la C.I.C.Y.T. (proyecto núm. PB 0247) y por la Acción Integrada Hispano-Francesa núm. 41/218 (1988).

## Referencias

- Agard, J.; Jouravsky, G. y Milliard, Y. (1959). Les gites minéraux (graphite, vermiculite, magnésite, nickel, cuivre, chrome) liés aux roches ultrabásiques et métamorphiques des Beni-Bousera (Rif Septentrional). *Mines et Geol.*, Rabat, 8, 31-37.
- Bertrand, P. y Mercier, J. C. (1986). The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural systems? *Earth Planet. Sci. Letters.*, 79, 109-122.
- Boudier, F. y Nicolás, A. (1972). Fusion partielle gabbroïque dans la lherzolite de Lanzo (Alpes piemontaises). *Schweiz. Mineral. Petrogr.*, 52, 39-56.
- Bouillin, J. P. y Kornprobst, J. (1974). Associations ultrabásiques de Petite Kabylie: péridotites de type alpin et complexe stratifié; comparaison avec les zones internes bético-rifaines. *Bull. Soc. Geol. Fr.* (7), 16, 183-194.
- Czamanske, G. K.; Himmelberg, G. R. y Goff, F. E. (1976). Zoned Cr, Fe-spinel from the La Perouse layered gabbro. Fairweather range. Alaska. *Earth Planet. Sci. Letters*, 33, 111-118.
- Frey, F. A.; Suen, C. J. y Stockman, H. W. (1985). The Ronda high temperature peridotite: Geochemistry and petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2469-2491.
- Gervilla, F.; Torres-Ruiz, J. y Fenoll Hach-Ali, P. (1987). Las mineralizaciones de Cr-Ni de los macizos ultrabásicos de la provincia de Málaga (Sur de España). Caracterización, tipos composicionales y relaciones con las facies de las rocas encajantes. *Bol. Geol. Min.*, 98, 357-375.
- Ghisler, M. (1976). Composition and classification of chromites in the Fiskenaeset anorthosite complex. *Rapp. Groenland Geol. Unders.*, 73, 61-66.
- Henderson, P. (1975). Reaction trends shown by chrome-spinels of the Rhum layered intrusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, 1.035-1.044.
- I.G.M.E. (1978). Estudio de las posibilidades mineras de los macizos ultrabásicos de Málaga. Primera parte: Fase previa para la investigación de níquel, Serranía de Ronda, Carratraca (Málaga). *Instituto Geológico y Minero. Colección informes*, 69 p.
- Irvine, T. N. (1967). Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part II: petrologic applications. *Can. J. Earth Sci.*, 4, 71-103.
- Irvine, T. N. (1976). Chromite crystallization in the join  $Mg_2SiO_4$ - $CaMgSi_2O_6$ - $CaAl_2Si_2O_8$ - $MgCr_2O_4$ - $SiO_2$ . *Carnegie Inst. Wash. Yearb.*, 76, 465-472.
- Jackson, E. D. (1969). Chemical variation in coexisting chromites and olivine in chromite zones of the Stillwater Complex. *Econ. Geol.*, 4, 41-71.
- Kornprobst, J. (1969). Le massif ultrabásique des Beni Bouchera (Rif Interne, Maroc): Etude des péridotites de haute température et de haute pression, et des pyroxénolites à grenat ou sans grenat, qui leur son associées. *Contrib. Miner. Petrol.*, 23, 283-322.
- Kornprobst, J. y Vialzeuf, D. (1984). Transcurrent crustal thinning: a mechanism for the uplift of deep continental crust/upper mantle associations. In *Kimberlites II: the mantle and crust-mantle relationships*. Kornprobst, Ed., Elsevier, 347-359.
- Leblanc, M. (1985). Les gisements de spinelles chromifères. *Bull. Mineral.*, 108, 587-602.
- Leblanc, M. (1986). Co-Ni Arsenide deposits, with accessory gold, in ultramafic rocks from Morocco. *Canad. J. Earth Sci.*, 23, 1.592-1.602.
- Leblanc, M. y Gervilla, F. (1988). PGE and Au distribution in Ni arsenide-chromite veins from the Rifo-Betic lherzolite massifs (Morocco/Spain). In *Geoplatinum'87*. Prichard et al., Ed. Elsevier, Applied Science, 181-198.
- Leblanc, M. y Johan, Z. (1986). Un nouveau type de minéralisation platinifère: exemple des filons à arsénifères de nickel et chromite du massif lherzolitique des Beni-Bousera (Maroc). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 303, 163-166.
- Leblanc, M. y Temagout, A. (1988). Chromite pods in a lherzolite massif (Collo, Algeria). Evidence of oceanic-type mantle rocks along the west mediterranean alpine belt. *Lithos* (en prensa).
- Lundeen, M. T. (1978). Emplacement of the Ronda peridotite, Sierra Bermeja, Spain. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 172-180.
- Misseri, M. (1987). Structure et cinématique des péridotites feldspathiques du Cap Bougaroun (Algérie). *J. African. Earth Sci.*, 6, 109-115.
- Nicolas, A. y Dupuy, C. (1984). Origin of ophiolitic and oceanic lherzolites. *Tectonophysics*, 110, 177-184.
- Obata, M. (1980). The Ronda peridotite: Garnet-, Spinel-, and Plagioclase-lherzolite facies and the P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion. *J. Petrol.*, 21, 533-572.
- Obata, M. (1982). Replay to W. Schubert's Comments on "The Ronda Peridotite: Garnet-, Spinel-, and Plagioclase-lherzolite Facies and the P-T trajectories of a High-Temperature Mantle Intrusion. *J. Petrol.*, 23, 296-298.
- Oen, I. S. (1973). A peculiar type of Cr-Ni-mineralization; cordierite-chromite-niccolite ores of Málaga, Spain, and their possible origin by liquid unmixing. *Econ. Geol.*, 68, 831-842.
- Oen, I. S.; Burke, E. A. J.; Kieft, C. y Westerhof, A. B. (1971). Ni-Arsenides, Ni-rich loellingite and (Fe-Co)-rich gersdorffite in Cr-Ni-ores from Málaga province. Spain. *N. Jb. Miner. Abh.*, 115, 123-139.
- Oen, I. S.; Kieft, C. y Westerhof, A. B. (1973). Composition of chromites in cordierite- and mica-bearing Cr-Ni ores from Málaga province. Spain. *Mineralog. Mag.*, 39, 193-203.
- Oen, I. S.; Kieft, C. y Westerhof, A. B. (1979). Variations in composition of chromites from chromite-arsenide deposits in the peridotites of Málaga, Spain. *Econ. Geol.*, 74, 1.630-1.636.
- Oen, I. S.; Kieft, C.; Burke, E. A. J. y Westerhof, A. B. (1980). Orcelite and associated minerals in the Ni-Fe-As-S system in chromites and ortopyroxenites of Nebral, Málaga, Spain. *Bull. Miner.*, 103, 198-208.
- O'Hara, M. J. (1967). Mineral paragenesis in ultrabasic rocks. In: *Ultramafic and related rocks* (P. J. Willie, Ed.) New York, 393-401.
- Polve, M. (1983). *Les isotopes du Nd et du Sr dans les lherzolites orogéniques: Contribution à la détermination de la structure et de la dynamique du manteau supérieur*. These Université de Paris VII, 360 págs.
- Rosso de Luna, I. (1955). Estudio metalogénico de los yacimientos de cromo y níquel San Juan, El Inglés y El Sapo de la comarca de Carratraca (Málaga) (inédito).
- Reuber, I., Michard, A.; Chalouan, A.; Juteau, T. and Jermoumi, B. (1982). Estructure and emplacement of the alpine type peridotites from Beni Bousera, Rif, Morocco: A polyphase tectonic interpretation. *Tectonophysics*, 82, 231-251.

- Schreyer, W. (1985) Experimental studies on cation substitutions and fluid incorporation in cordierite. *Bull. Miner.*, 108, 273-291.
- Schubert, W. (1977). Reaktionem im alpinotypen Peridotit masiv von Ronda (Spanien)-und seinen partiellen. Schmelz-producten. *Contrib. Miner. Petrol.*, 62, 205-220.
- Schubert, W. (1982). Coments on «The Ronda peridotite: garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the P-T trayectories of a high-temperature mantle intrusion» by M. Obata (*J. Petrol.*, 21, 533-572, 1980). *J. Petrol.*, 23, 293-295.
- Suen, C. J. y Frey, F. A. (1987). Origins of the mafic and ultramafic rocks in the Ronda Peridotite. *Earth Planett. Sci. Letters.*, 85, 183-202.
- Tubia, J. M. (1984). Emplazamiento hacia el ENE del manto de Los Reales (Alpujárrides Occidentales): Criterios estructurales y de petrofábrica. *Estudios Geol.*, 40, 177-182.
- Tubia, J. M. (1985 b). *Sucesiones metamórficas asociadas a rocas ultramáficas en los Alpujárrides Occidentales (Cordilleras Béticas, Málaga)*. Tesis Univ. País Vasco, 300 págs.
- Tubia, J. M. (1985 b). Estudio de las deformaciones internas en las peridotitas de Sierra Alpujáta (Málaga). *Estudios Geol.*, 41, 369-380.
- Tubia, J. M. y Cuevas, J. (1986). High-temperature emplacement of Los Reales peridotite nappe (Betic Cordillera, Spain). *Jour. Struct. Geol.*, 8, 473-482.
- Wells, P. R. A. (1977). Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Miner. Petrol.*, 62, 129-139.

Recibido el 3 de julio de 1988  
Aceptado el 3 de noviembre de 1988