

Discusión sobre el metamorfismo regional del Guadarrama oriental (Sistema Central español)

por J. M.^a FUSTER* y L. GARCÍA CACHO*

RESUMEN

Se aportan datos que confirman que el metamorfismo del Guadarrama oriental corresponde al tipo distena-sillimanita, con un desarrollo zonal que tiene grandes analogías con el metamorfismo barrowiense. Las zonas encontradas: clorita-cloritoide-estaurolita-distena-sillimanita, y el desarrollo generalizado del almandino en la mayor parte del ámbito metamórfico indican unas condiciones de presión elevada y de un gradiente geotérmico relativamente reducido. Este tipo de sucesión metamórfica es considerablemente diferente del que existe en otros sectores del del Guadarrama central y occidental, donde aparecen tipos de más baja presión y (o) más alta temperatura con andalucita o cordierita como minerales sintomáticos en grados elevados de este metamorfismo.

Para este sector no son aceptables muchos de los datos y las conclusiones publicadas por BARD et al. (1970, 1971).

RÉSUMÉ

Les données exposées dans ce travail confirment que le métamorphisme dans le Guadarrama oriental correspond au type disthène-sillimanite, avec un développement zonal qui présente des grandes analogies avec le métamorphisme Barrowien. Les zones identifiées: chlorite-chloritoïde-stauroïde-disthène-sillimanite, ainsi que le développement général du grenat almandin indiquent des conditions de forte pression et un gradient géothermique relativement faible. Ce type de succession métamorphique est considérablement différent de celui qui se présente dans d'autres secteurs du Guadarrama central et du Guadarrama occidental où l'on trouve des types de plus faible pression et (ou) plus haute température, avec de l'andalousite ou de la cordiérite comme minéraux caractéristiques dans les degrés élevés de ce métamorphisme.

Dans le secteur étudié on ne peut pas accepter une grande partie des données et des conclusions qui ont été publiées par BARD et al. (1970, 1971).

ANTECEDENTES

En 1970, BARD et al. tras realizar unos recorridos generales por el Sistema Central español publicaron una nota sobre los grandes rasgos estratigráficos, tectónicos, metamórficos y plutónicos de las sierras de Gredos y Guadarrama (4 págs.). Para estos autores

el metamorfismo del Sistema Central es del "tipo intermedio de baja presión" y tendría lugar con un grado geotérmico medio del orden de $35 \pm 5^\circ \text{C/km}$ (pág. 2.632). Estos autores no mencionan en su trabajo excepciones a esta regla general, utilizando como criterios de separación en zonas las isogradas estaurolita (+) moscovita (—).

FUSTER y GARCÍA CACHO (1970), encontraron que la generalización anterior no era aplicable al sector del Guadarrama oriental, situado al E de la transversal del Puerto de Somosierra, pues en esta zona la sucesión de zonas encontrada (clorita-cloritoide-estaurolita-distena-silimanita), "tiene grandes analogías con el metamorfismo "barrowiense".

Más adelante concluyen que

"en el sector del Sistema Central situado al E de Somo-"
"sierra el metamorfismo se ha realizado a gran profundi-"
"dad y con desarrollos de gradientes geotérmicos mucho"
"menos elevados que los que consideran BARD et al. (1970."

En una nueva nota, BARD et al. (1971) tratan de discutir las conclusiones anteriores. Como los autores de esta réplica no están de acuerdo ni con la argumentación utilizada por BARD et al., ni con la utilización parcial de la bibliografía que hacen en su trabajo, ni con muchos de los datos y afirmaciones que deslizan en él, se exponen a continuación los argumentos principales que apoyan la idea expuesta en nuestro trabajo de 1970 y se discuten las conclusiones de BARD et al. expuestas en 1970 y 1971.

Creemos conveniente aclarar, que nuestra nota de 1970 tenía por objeto fundamental más que discutir el trabajo de BARD et al (1970) informar sobre los caracteres generales del metamorfismo de un sector en el que el Departamento de Petrología de la Universidad de Madrid viene trabajando desde hace bastantes años y en el cual se están realizando varias tesis doctorales.¹

1. Circunstancia conocida por los miembros del Laboratorio de Petrología de la Universidad de Montpellier previamente a su trabajo de 1970.

* Departamento de Petrología y Geoquímica, Madrid.

En esta réplica, como ya se hizo en el trabajo de 1970 nos limitamos únicamente a discutir el carácter del metamorfismo en el sector del Sistema Central situado al E de Somosierra, representado en nuestro esquema geológico publicado en aquella época. Puesto que en el fondo las discrepancias sobre el carácter del metamorfismo estriban en la existencia o no existencia de distena o de cordierita como mineral zonal en el Guadarrama oriental, en una primera parte se expondrán los datos que apoyan la existencia de la zona de la distena. En otro apartado se discutirá el carácter del metamorfismo basándose en las paragénesis minerales encontradas en este sector.

Para trabajos posteriores dejamos la discusión sobre la aplicación de la generalización realizada por BARD et al. (1970) a otros sectores del Guadarrama central y occidental, donde tampoco se encuentran las condiciones del metamorfismo que han postulado estos autores.

SOBRE LA EXISTENCIA DE UNA ZONA DE DISTENA EN LAS ROCAS METAMÓRFICAS DEL SISTEMA CENTRAL ESPAÑOL

La existencia de distena en las rocas metamórficas del Guadarrama oriental es conocida por los geólogos españoles desde hace más de un siglo. PRADO (1864, p. 106) la menciona en El Berruero y Montejo; PALACIOS (1879, p. 332) la encontró en las rocas metamórficas de La Cebollera, Excomuni6n y El Cardoso; CASTEL (1881, p. 167) en El Cardoso y La Hiruela; CORTAZAR (1891, p. 141) en las zonas metamórficas de la provincia de Segovia. CALDERÓN (1910, p. 333) resalta el hecho de que desde principios del siglo XIX

"son conocidos ... con el nombre de distenas castellanas"
 "hermosos ejemplares de este silicato en anchas placas..."
 "Existen, sobre todo, en las cordilleras centrales."

Las localidades de El Cardoso, La Hiruela, Torrelaguna, Serrada, Paredes, Somosierra, Montejo de la Sierra y Horcajuelo, mencionadas por CALDERÓN, son bien conocidas por los coleccionistas y por numerosas generaciones de estudiantes de Geología de Madrid, que han realizado, casi cada curso, prácticas de campo en estas localidades del Guadarrama oriental, ya clásicas en la geología española. La mayoría de las localidades antes mencionadas quedan incluidas en el sector estudiado por FUSTER y GARCÍA CACHO (1970).

En este trabajo de FUSTER y GARCÍA CACHO (1970, fig. 1 y p. 327-329) se establece *por primera vez* la existencia de una zona de distena, limitada por las isogradas distena (+), distena (—) y situada entre las zonas de la estaurolita y de la sillimanita. La zona de la distena forma una banda de unos 1.000 m de

anchura que puede seguirse en dirección N-S en más de 25 km, desde 2 km al E de la estación de ferrocarril de Riaza en el N, hasta 2 km al E de Prádena del Rincón en el S, pasando por el pico del Cervunal, valle del río del Ermito, El Chaparral y La Dehesa.

En esta zona las rocas metamórficas de composición apropiada *tienen siempre distena abundante como mineral estable* y debe ser utilizada, por tanto, como mineral sintomático de la intensidad del metamorfismo.

No es cierto aunque lo afirman BARD et al. (1971, p. 47) que HEIM describiera

"por la primera vez en 1952, la zona de la distena que"
 "aquí estamos discutiendo."

HEIM (1952, p. 44) dice textualmente:

"no evidence of a cyanite zone was found. One occurrence of cyanite was met with at —2000 metres above the biotite isograde, a second one at —3000 metres, below the biotite isograde, and another one at —7000 metres, in flaser-gneiss, in about the deepest part of the whole region."¹

La zona de la distena se representó por FUSTER y GARCÍA CACHO (1970, fig. 1) con criterios restrictivos (distena estable) pues fuera de la zona de la distena se encuentran esporádicamente rocas metamórficas con este mineral, aunque casi siempre en el sector del Guadarrama oriental. Distena hemos encontrado en puntos de la zona de la sillimanita de nuestro esquema geológico, y también fue encontrada por los autores del siglo pasado en varios puntos del Sistema Central al E de la transversal de Somosierra, algunos citados al principio de este capítulo. También la encontró HEIM en tres puntos aislados del sector situado al SW de nuestro plano. En los casos que nosotros conocemos de rocas con distena *fuera de la zona de la distena*, este mineral aparece algunas veces como estable o metaestable y otras veces con relaciones texturales con otros silicatos aluminicos que parecen indicar inestabilidad.

A la vista de todos estos hechos, que son comprobables, creemos que se puede afirmar como ya lo hicimos en nuestro trabajo de 1970, que en el Guadarrama oriental existe una zona de la distena en donde durante el metamorfismo se han alcanzado las condiciones de P/T necesarias para la formación de este mineral.

El hecho de que aparezca distena esporádicamente fuera de la zona de la distena, puede interpretarse correctamente admitiendo que, en un sector más amplio, la curva de P/T durante el metamorfismo estuvo muy cerca (o dentro) del campo de estabilidad de la distena.

1. La zona estudiada por HEIM queda al SW del sector estudiado por FUSTER y GARCÍA CACHO.

Para clarificar esta fase de la discusión y las sucesivas, conviene decir que es muy extraño, teniendo en cuenta la importancia de la distena en la fijación del carácter del metamorfismo, que BARD et al. ignoren por completo la distena en su trabajo de 1970, en tanto que al hacer la discusión en 1971 del trabajo de FUSTER y GARCÍA CACHO (1970) incluyan a este mineral entre los sintomáticos del metamorfismo.

NO EXISTENCIA DE ZONAS DE LA CORDIERITA O DE LA ANDALUCITA EN EL SECTOR DISCUTIDO

En el sector cartografiado por nosotros (representado en la fig. 1 del trabajo de 1970) no puede en ningún caso considerarse a la cordierita como mineral estable.

Nosotros nunca lo hemos encontrado en los varios centenares de preparaciones estudiadas. BARD et al. (1971) mencionan en Horcajuelo de la Sierra, minerales pinitizados que atribuyen a cordierita. No discutimos esta suposición, pero creemos que utilizar un ejemplo aislado y problemático para fijar las condiciones del metamorfismo, no está justificado.

BARD et al. (1971, p. 47) desorientan al lector que no conozca estas regiones al incluir citas sobre presencia de cordierita en el Guadarrama. Tal ocurre con las menciones que hacen a las rocas con cordierita estudiadas por HEIM (1952) localizadas en su sector situado al SW del que discutimos, influenciado por otra parte por intrusiones graníticas considerables. Lo mismo ocurre con su propia cita de haber encontrado cordierita al SSW de Robregordo (Robregordo está situado al W de Somosierra), también situado en el límite W o fuera de la zona que nosotros discutimos.

Estas menciones fuera de lugar apoyan nuestra tesis expuesta en 1970 de que en el sector situado al E de la transversal de Somosierra las condiciones del metamorfismo son diferentes que las que existen al W de esta banda.

El otro mineral de baja presión, la andalucita, tampoco puede ser considerado como mineral índice del metamorfismo en el sector discutido. Ya mencionamos en 1970 (p. 328) que aunque existe andalucita, ésta aparece en venas de segregación cuarzosa posteriores al proceso metamórfico que nos ocupa, e incluso en un caso aislado, la hemos encontrado asociada a distena y sillimanita dentro de las rocas metamórficas.

Por supuesto no descartamos la posibilidad de que aparezcan nuevas citas a estos minerales dentro del sector que nosotros estudiamos, pero de antemano, mientras no se aporten datos concretos sobre su abundancia y relaciones con otros minerales, interpretamos estos casos aislados como lo hemos hecho con las citas a la distena fuera de la zona de la distena (que

son mucho más frecuentes) es decir, como apariciones metaestables o inestables que no pueden ser utilizadas para desvirtuar nuestra conclusión de 1970 de que en el Guadarrama occidental existe una zona de la distena y no existen zonas de cordierita o andalucita y que por tanto las condiciones del metamorfismo en este sector, son diferentes a las de otros sectores del Guadarrama, y desde luego distintas a las establecidas por BARD et al. (1970) para el conjunto del Sistema Central.

La cordierita y la andalucita sí son, por el contrario, minerales sintomáticos de las condiciones del metamorfismo en bastantes sectores del Guadarrama central y occidental. Este hecho es conocido por los geólogos españoles que trabajan en el Sistema Central (P. GAMONAL CAMPOS, 1966; L. F. BLANCO HONRADO, 1967). Los trabajos más recientes de FUSTER y MORA PEÑA (1970); PEINADO MORENO (1970), determinan sin género de dudas que el metamorfismo en estas zonas del Sistema Central se caracteriza por gradientes de P/T que no llegan a penetrar en el campo de estabilidad de la distena.

MIYASHIRO creó el concepto de metamorfismo intermedio de baja presión (ver p. e. 1961, p. 286) para aquellos casos en que la presión se ha desarrollado con valores intermedios entre el tipo distena-sillimanita (alta presión) y el tipo andalucita-sillimanita (baja presión). Este autor dio como carácter distintivo de este tipo de metamorfismo el que en él apareciese estauroлита (como ocurre en el tipo distena-sillimanita) y también andalucita y cordierita como en el tipo andalucita-sillimanita.

WINKLER (1967, pp. 125-130) al discutir estas secciones de facies intermedias pone como ejemplos los metamorfismos de New Hampshire, Michigan y Pirineos orientales. En la tabla 7 da como minerales índices de estos ejemplos representativos la *andalucita* y *cordierita* pero no la *distena* aunque este último mineral pueda aparecer accidentalmente. Creemos bastante ilustrativo lo que este autor indica al comentar estos tipos intermedios de baja presión:

"Table 7 presents a compilation of the various facies series. Within the realms of the amphibolite facies, these contrast with each other when the succession of the appearance of particular minerals or particular mineral assemblages is considered. The differences in the pressure operating in the individual cases can be recognized from this as well as from the presence or absence of kyanite or andalusite, of which the former unequivocally denotes a very high pressure."

BARD et al. (1971) para defender sus afirmaciones de 1970 no dudan en seguir llamando metamorfismo de baja presión a un metamorfismo en el que se desarrolla distena como mineral estable y concluyen que la curva de gradiente geotérmico debía pasar muy cerca del punto triple del Al_2SiO_5 . Esta última circunstancia es admitida por todos los autores para el meta-

morfismo barrowiense (Véase por ejemplo la fig. 4, p. 285 de MIYASHIRO, 1961) y por ello creemos que BARD et al. (1971) crean un confusiónismo en la nomenclatura sobre tipos de metamorfismo que no creemos justificado.

METAMORFISMO BARROWIENSE Y METAMORFISMO INTERMEDIO DE BAJA PRESIÓN

BARD et al. (1971) parece que nos atribuyen la afirmación de que en nuestro trabajo de 1970 establecimos una identidad entre el metamorfismo del Guadarrama oriental y el metamorfismo de los Grampian Highlands de Escocia. El lector del trabajo de BARD et al. (1971) puede quedar desorientado, pues la crítica a nuestro trabajo está basada en el establecimiento de unas supuestas diferencias, que después comentaremos, entre estas dos regiones geográficas concretas, cosa que nunca hemos hecho. La desorientación puede ser mayor pues BARD et al. (1971, p. 46) parten de una cita parcial e incompleta de nuestro trabajo de 1970. La cita que ahora transcribimos textualmente, es la siguiente:

"en el Guadarrama oriental el metamorfismo regional es" "del tipo denominado por MIYASHIRO (1961) "distena-sillimanita". La sucesión que establecemos tiene grandes" "analogías con el metamorfismo barrowiense (WINKLER, 1967; TURNER, 1963)."

Para que quede claro lo que se quiso decir en esta frase transcribimos a continuación algunas citas de los autores mencionados en el párrafo anterior:

"*Kyanite-sillimanite type*. This standard type of facies" "series is characterized by the stability of kyanite in" "a lower grade and that of sillimanite in a higher" "grade so far as chemical conditions permit. Andalusite" "and glaucophane are absent." (MIYASHIRO, 1961 p. 178).
 "In this type almandine garnet occurs commonly in the" "middle and high grades, not only in pelitic but also in" "basic metamorphic rocks. Staurolite is also common," "while cordierite is absent." (MIYASHIRO, 1961, p. 278).
 "*Barrowian-Type Facies Series*. One of the standard" "types of metamorphic facies series referred to by" "MIYASHIRO as the "Kyanite-sillimanite-type" has been" "developed particularly well in the Grampian Highlands" "of Scotland... This facies series has also been named" "Barrowian-type..."
 "This facies series also occurs as an essential feature" "of the Caledonian metamorphism of Norway and of" "the metamorphism in the Appalachians of northern" "América". (WINKLER, 1967, p. 89).
 "... the order of appearance of the metamorphic zones" "characteristic for this facies series is easily discernible," "namely, chlorite → biotite → garnet (almandine) → staurolite → kyanite → sillimanite. Specially the appearance" "of almandine garnet, staurolite and kyanite and, typically, that of all three of them within the facies series, is" "distinctive. This facies series originates under a rather" "low geothermal gradient; in other words, the metamor-

"phic temperatures were operating at great depth under" "high pressure. This is suggested by the presence of" "kyanite and absence of andalusite". (WINKLER, 1967, p. 90).

Está claro que ninguno de los autores anteriores, ni tampoco nosotros, pretendemos establecer identidades entre dos regiones geográficas concretas, pues cualquier investigador en regiones metamórficas sabe que no existen dos regiones metamórficas que sean rigurosamente iguales. Nosotros, en el trabajo de 1970 y en éste, tratábamos de resaltar el hecho de que un metamorfismo tipo distena-sillimanita, barrowiense, es diferente de un tipo andalucita-sillimanita y que las diferencias entre estos dos tipos estriban precisamente en que el metamorfismo barrowiense se establece a más alta presión y con gradientes geotérmicos más bajos que el metamorfismo tipo andalucita-sillimanita.

SOBRE EL CARÁCTER DEL METAMORFISMO EN EL GUADARRAMA ORIENTAL

La sucesión general de metamorfismo dada por BARD et al. en 1970 (p. 2.362), que no es aplicable a todo el Sistema Central español, está basada en la división del ámbito metamórfico en tres zonas. Para BARD et al. la de menor grado, con clorita, puede tener cloritoide; la de grado intermedio, se iniciaría con la formación de estaurolita y terminaría con la desaparición de la moscovita; la de más alto grado, con ortosa-sillimanita, se caracterizaría por la migmatización generalizada y formación de granitoides ya iniciada antes de la isograda moscovita (—). En estas dos últimas zonas, según los autores citados, puede existir cordierita y eventualmente (citan a HEIM, 1952) puede existir andalucita.

FUSTER y GARCÍA CACHO (1970, pp. 328-329) establecieron las siguientes zonas en el Guadarrama oriental, caracterizadas (en rocas metapelíticas) por las siguientes asociaciones:

- A. Zona de la clorita: Q-Ms-Clor.
- B. Zona del cloritoide: Q-Ms-Bi-Alm-Clde-Ab.
- C. Zona de la estaurolita: Q-Ms-Bi-Alm-Est.
- D. Zona de la distena: Q-Ms-Bi-Alm-Dist-Plag.
- E. Zona de la sillimanita: Q-Bi-Ms-Or-Sill.

La aparición y desaparición de minerales para orden creciente de metamorfismo es la siguiente:

- Clorita (+) Moscovita (+)
 Cloritoide (+) Biotita (+)
 Almandino (+)
 Clorita (—)

Estaurolita (+)
 Cloritoide (—)
 Distena (+) Sillimanita (+)
 Estaurolita (—) Distena (—)
 Moscovita (—)

Esta serie ha sido establecida por nosotros tras el estudio detallado de unas 1.200 muestras. Dentro de esta seriación general existen variaciones locales que serán estudiadas e interpretadas en un trabajo posterior.

Aunque BARD et al. (1970) dieron una sucesión de zonas y cambios mineralógicos muy diferente de la que nosotros establecimos en 1970, en su trabajo de 1971, p. 47, incluyen (al fin) la distena aunque al final agregan la cordierita entre la desaparición de la distena y antes de la isograda moscovita (—).

Aparte de estas puntualizaciones de carácter general creemos que BARD et al. al discutir el tipo de metamorfismo en el Guadarrama oriental (1971, página 47) hacen una serie de afirmaciones que deben ser rechazadas:

Sobre el granate

BARD et al. (1971, p. 47) afirman, no sabemos basándose en qué datos que

“La zona del Granate, que aflora sobre varios miles de”
 “kilómetros en Escocia, es tan pequeña en el Guadarrama.”
 “ma que J. M. FÚSTER y L. GARCÍA CACHO no han juzgado necesario representarla en su mapa.”

Esta cita indica por un lado un conocimiento muy somero de las regiones orientales del Guadarrama y por otro una lectura poco cuidadosa de lo que nosotros dijimos en nuestro trabajo de 1970.

El granate, en el Guadarrama oriental, es un mineral que aparece casi sin excepción en cualquier tipo de roca (esquistos, cuarcitas, gneises) y con mucha frecuencia con extraordinaria abundancia, en nuestras zonas B (Cloritoide), C (Estaurolita), D (Distena) e incluso E (Sillimanita), es decir en prácticamente todo el ámbito metamórfico estudiado. En la lista de minerales característicos de estas zonas, publicada en 1970 (pp. 328, 329) aparece específicamente mencionado el almandino.

El que nosotros no incluyéramos en nuestro esquema geológico una zona del granate se debe sencillamente a que esta zona queda superpuesta a las otras que se han definido y por lo tanto no introduciría en el esquema geológico nuevos elementos cartográficos (el esquema es un plano de zonas, no de isogras).

Conviene ahora precisar nuevos datos sobre los granates del Guadarrama oriental ya que BARD et al. (1970, p. 47) suponen que puede ser “un pyralspito rico en espesartita”.

De los análisis químicos cuantitativos por microsonda electrónica que ha realizado J. LÓPEZ RUIZ de granates del Guadarrama oriental¹ anticipamos los siguientes datos:

	MnO	FeO	MgO	CaO
Base de la zona de cloritoide . . .	3,31	36,0	1,2	2,9
Parte alta de la zona del cloritoide y zona de la estaurolita . . .	1,10	39,2	2,1	1,5
Zonas de la distena y sillimanita . . .	1,29	35,2	1,7	5,4

Estos datos son valores medios que se refieren a muestras de análoga composición litológica (metapelitas) y ponen de manifiesto que:

1.º El almandino, muy puro, es estable desde antes de finalizar la zona del cloritoide hasta los términos de metamorfismo muy intenso.

2.º Que los granates con un contenido algo más elevado en manganeso sólo aparecen en los términos más bajos del metamorfismo, circunstancia bien conocida de los metamorfismos barrowienses.

Se deduce de todo esto que las diferencias que BARD et al. (1971) tratan de establecer entre el metamorfismo de los Highlands de Escocia y el del Guadarrama oriental, son de signo contrario a la que estos últimos autores afirman. Si sólo se atendiera al granate almandino el metamorfismo en el Guadarrama oriental se habría desarrollado a mayor presión que en los Highlands de Escocia.

Sobre la extensión de las zonas de la distena y de la estaurolita

BARD et al. (1971, p. 47) dicen:

“La poca potencia de las zonas del granate y de la distena en el Guadarrama oriental, sumada al desarrollo”
 “importante de la zona de la estaurolita son suficientes”
 “para demostrar que el tipo de metamorfismo de la región”
 “discutida es de presión bastante inferior a la del tipo”
 “barrowiense y por lo tanto se trata de un tipo intermedio de baja presión.”

Confundir los conceptos de extensión y de intensidad hacen tambalear los principios sobre los que están orientados los estudios sobre carácter del metamorfismo. En metamorfismo, si se ha encontrado como estable una asociación de minerales A + B, etc., que se sabe por datos experimentales que comienza a formarse por encima de un determinado conjunto de valores X, Y de P/T, se deduce que se ha alcanzado un determinado grado de metamorfismo o que el metamorfismo ha seguido una pauta de P y T dentro de ciertos límites. Si por ejemplo una determinada

1. J. LÓPEZ RUIZ y L. GARCÍA CACHO: Composición de los granates de las zonas metamórficas del Guadarrama oriental. *Estudios Geológicos* (en prensa).

paragénesis sólo se forma, digamos, a partir de 3 kilobars, cualquiera que sea la temperatura, cada vez que encontremos esta paragénesis se puede admitir que durante el metamorfismo se han superado los tres kilobars de presión.

El factor *intensidad* tiene mucho mayor significado en metamorfismo que el factor *extensión* no sólo por las razones antes expuestas sino también porque la extensión de una zona metamórfica (establecida por la presencia estable de un mineral) depende de los factores P y T y también de la composición del material que se metamorfiza pues si la composición no es favorable, el mineral no aparece. La no aparición de un determinado mineral en una zona o la aparición continuada de un mineral en zona o zonas nunca puede ser utilizada como medida cuantitativa del carácter del metamorfismo si no se tienen en cuenta los factores composicionales y también los de estructura geológica.

La argumentación de BARD et al. (1971) parece prestar mayor atención a los aspectos extensivos que a los intensivos, pero aparte de ello utiliza datos de base erróneos. Ya hemos hecho comentarios en el apartado anterior sobre la extensión de la zona del granate y en el primer capítulo de este trabajo aclaramos los criterios restrictivos con los que se ha delimitado la zona de la distena.

En cuanto a la extensión relativamente importante de la estauroлита es conveniente recordar que este mineral requiere, como todos, condiciones límites de composición que se dan en las metapelitas del Guadarrama oriental, pero además hay que tener en cuenta los datos experimentales recientes que existen sobre este mineral. Nos remitimos por ahora a la discusión realizada por WINKLER (1970, pp. 233 a 235 y fig. 9, página 239) sobre la salida de la estauroлита, basada en los datos experimentales obtenidos por RICHARDSON (1968) y HOSCHEK (1969). Se puede admitir que la estauroлита, en presencia de moscovita y cuarzo origina biotita, o biotita y almandino junto con un polimorfo del Al_2SiO_5 (andalucita a bajas presiones; o sillimanita a presiones más altas) cuando se está en zonas donde no se produce anatexis. En estas condiciones la descomposición de la estauroлита se produce a temperaturas progresivamente más altas cuanto mayor es la presión. Cuando las presiones son mayores de 5-6 kilobars la estauroлита, en presencia de cuarzo, origina almandino y un polimorfo del silicato aluminico (distena y o sillimanita) y en este caso la curva de transformación tiene lugar aproximadamente a los 700 °C tanto a presiones moderadas como a presiones altas. En cualquiera de los dos casos parece evidente que las altas presiones estabilizan la estauroлита y por ello el que la zona de la estauroлита en el Guadarrama oriental sea de considerable extensión no puede nunca ser interpretado como lo hacen BARD et

al. (1971, p. 47) como un criterio diferencial para indicar que el metamorfismo del Guadarrama oriental es de menor presión que el barrowiense.

P_{H₂O}, P_L y anatexis en el Guadarrama oriental

No hemos llegado a comprender la argumentación que utilizan BARD et al. en la utilización de los datos sobre presión estática (P_L), presión de vapor de agua (P_{H_2O}), anatexis y carácter del metamorfismo en el Sistema Central español.

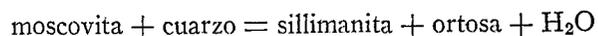
En su nota de 1970 (p. 2.632) indican que la migmatización se produce antes de que desaparezca la moscovita. Si se dan estas condiciones es evidente que P_{H_2O} debe ser elevada y probablemente $P_{H_2O} > P_L$.

En este mismo trabajo, refiriéndose al conjunto del Sistema Central consideran que las anatexitas de esta región tienen afinidades charnokíticas. Bajo estas condiciones $P_{H_2O} < P_L$.

En el trabajo de BARD et al. de 1971 (p. 47) se vuelve a afirmar que: "En todo el Sistema Central, existen evidencias de que a partir de la formación de la sillimanita P_{H_2O} es inferior a P_L ".

¿Cómo conciliar estos datos contradictorios?: Anatexis temprana y presión reducida.

En lo que se refiere al Guadarrama occidental se puede asegurar que la isograda moscovita (—), es decir la reacción:



está muy distanciada de la isograda de formación de la sillimanita (+) y P_{H_2O} es siempre igual o superior a P_L .

El gradiente geotérmico posible en el Guadarrama oriental

BARD et al. (1970, p. 2.632) postularon un gradiente geotérmico medio para el Sistema Central del orden de 35 ± 5 °C/km.

En nuestro trabajo de 1971 indicamos que en la zona oriental del Guadarrama, teniendo en cuenta las asociaciones metamórficas encontradas este valor debía ser mucho menor, sin que fijáramos ningún valor concreto.

En la réplica de BARD et al. (1971), los autores admiten un valor de 30 °C/km utilizando como datos para hacer esta rebaja nuestras propias observaciones.

La fijación del gradiente geotérmico, en función de las paragénesis observadas durante el metamorfismo, está por supuesto sometida a las incertidumbres que existen en la fijación de valores P/T a las curvas de estabilidad de los minerales encontrados, pero en tanto no dispongamos de datos mejores debemos conformarnos con los que existen.

En el caso que nos ocupa, como en cualquier otro caso en el que se quiere evaluar la importancia de la presión en el metamorfismo, la posición de las curvas de transición entre los polimorfos andalucita, distena y sillimanita y la fijación del punto de confluencia entre las tres curvas es el mejor dato de que se dispone. Los valores más recientes que conocemos para el punto triple son los determinados por RICHARDSON et al. (1969) y ALTHAUS (1967, 1969). El primer autor fija el punto triple a 622 °C y 5,5 kb de presión; el segundo autor a temperaturas más bajas y presiones más altas: 595 ° ± 10 °C y 6,5 ± 0,5 kb. La posición de las curvas andalucita-sillimanita, andalucita-distena y distena-sillimanita en un diagrama P-T es tal que se puede afirmar que en un metamorfismo regional en el que aparezca distena se ha alcanzado por lo menos los 5,5 (según RICHARDSON) o los 6,5 ± 0,5 (según ALTHAUS) kilobares de presión.

Considerando como valor más correcto de aumento de presión con la profundidad (teniendo en cuenta la densidad de las rocas implicadas) el valor de 275 bar por km, la profundidad a que puede formarse la distena sería, según los datos de RICHARDSON, de 20 km y según los datos de ALTHAUS de 23,6 km.

Si se admitiese gradiente uniforme desde la superficie, los valores que resultarían para el gradiente medio según los datos de RICHARDSON serían del orden de 30 °C/km y según los datos de ALTHAUS de 25 °C/km.

Estos valores han de ser considerados como máximos pues se han considerado condiciones excesivamente restrictivas. Teniendo en cuenta que en el metamorfismo del Guadarrama oriental se ha penetrado por encima de las presiones necesarias para la formación de la distena, creemos que el valor de 25 ° ± 5 °C por km pueda considerarse como el valor más correcto para el gradiente geotérmico durante el metamorfismo del Guadarrama occidental.¹

CONCLUSIONES

1.º) El metamorfismo del Guadarrama occidental al E de la transversal de Somosierra tiene grandes semejanzas con el metamorfismo de tipo barrowiense. La sucesión zonal encontrada es: clorita-cloritoide-stauroлита-distena-sillimanita. En este sector no aparecen cordierita ni andalucita como minerales estables. El almandino es un mineral que aparece en cualquier tipo de rocas, desde la parte alta de la zona del cloritoide hasta dentro de la zona de la sillimanita.

2.º) El gradiente geotérmico medio que puede deducirse como más probable durante el proceso metamórfico es del orden de 25° ± 5 °C/km.

3.º) Existen profundas diferencias entre el metamorfismo de este sector y el de otras zonas del Sistema Central en donde no existe distena como mineral estable y en cambio la andalucita y la cordierita aparecen ampliamente representadas en rocas de composición apropiada.

Madrid, 25 de septiembre de 1971.

BIBLIOGRAFÍA

- ALTHAUS, E. (1967): The triple point andalusite-sillimanite-kyanite. *Contr. Miner. and Petrol.*, 16, 29-44.
- ALTHAUS, E. (1969): Das System $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, Experimentelle Untersuchungen und Folgerungen für die Petrogenese der metamorphen Gesteine. *N. Jb. Miner. Abh.*, 111, 74-161.
- BARD, J. P., R. CAPDEVILA et P. MATTE (1970): Les grands traits stratigraphiques, tectoniques, métamorphiques et plutoniques des Sierras de Gredos et de Guadarrama (Espagne centrale). *C.R. Acad. Sc. Paris*, 270, 2630-2633.
- BARD, J. P. R. CAPDEVILA y PH. MATTE (1971): Sobre el tipo de metamorfismo regional progresivo hercínico en el Guadarrama oriental (Sistema Central español). *Acta Geológica Hispánica*, 6, 46-48.
- BLANCO HONRADO, L. F. (1967): *Estudio petrológico de la zona situada al W de Manzanares el Real (provincia de Madrid)*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Madrid. *In literis*.
- CALDERÓN, S. (1910): *Los minerales de España*, vol. 2. Junta para ampliación de estudios e investigaciones científicas. Madrid, 561 pp.
- CASTEL, C. (1881): Descripción física, geognóstica, agrícola y forestal de la provincia de Guadalajara. *Bol. Com. Mapa Geol. España*, 1-270.
- CORTAZAR, D. DE (1891): Descripción física y geológica de la provincia de Segovia. *Bol. Com. Mapa Geol. España*, 17, 1-234.
- FUSTER, J. M., y L. GARCÍA CACHO (1970): Sobre el metamorfismo regional progresivo en el Guadarrama oriental (Sistema Central Español). *Estudios Geológicos*, 26, 327-329.
- FUSTER, J. M., y A. MORA PEÑA (1970): El carácter del metamorfismo en el macizo de La Cañada (Sistema Central Español). *Estudios Geológicos*, 26, 317-321.
- GAMONAL CAMPOS, P. (1966): *Estudio petrológico del macizo de Fuentidueña* (provincia de Segovia). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Madrid. *In literis*.
- HEIM, R. C. (1952): *Metamorphism in the Sierra de Guadarrama*. Proefschrift Utrecht, 69 pp.
- HOSCHEK, G. (1969): The stability of staurolite and chloritoid. *Contr. Miner. and Petrol.*, 22, 208-232.
- LÓPEZ RUIZ, J., y GARCÍA CACHO, L. (1971): Composición de

1. En estos cálculos no se ha tenido en cuenta el valor P_S , pues la distena es postcinemática.

- los granates de las zonas metamórficas del Guadarrama oriental. *Estudios Geológicos* (en prensa).
- MIYASHIRO, A. (1961). Evolution of metamorphic Belts. *Journal of Petrology*, 2, 277-311.
- PALACIOS, P. (1879): Reseña física y geológica de la parte NO de la provincia de Guadalajara. *Bol. Com. Mapa Geol. España*, 6, 321-352.
- PEINADO MORENO, M. (1970): Carácter del metamorfismo en el macizo metamórfico El Escorial-Villa del Prado (Sistema Central Español). *Estudios Geológicos*, 26, 323-326.
- PRADO, C. DEL (1864): *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*. Junta General de Estadística. Madrid, 219 pp.
- RICHARDSON, S. W. (1968): Staurolite stability in a part of the system Fe-Al-Si-O-H. *Journ. Petrology*, 9, 467-488.
- RICHARDSON, S. W., M. C. GILBERT, and P. M. BELL (1969): Experimental determination of kyanite- andalusite and andalusite-sillimanite equilibria; the aluminium silicate triple point. *Amer. J. Sci.*, 267, 259-272.
- WINKLER, H. G. F. (1967): *Petrogenesis of metamorphic rocks*, 2.^a ed. Springer-Verlag. Berlín, 237 pp.
- WINKLER, H. G. F. (1970): Abolition of Metamorphic Facies, Introduction of the four Divisions of Metamorphic Stage, and of a Classification based on Isograds in Common Rocks. *N. Jahrbuch f. Mineralogie, Monatshefte*, 189-248.