

# EL METAMORFISMO DE BAJO Y MUY BAJO GRADO DE LOS MATERIALES CARBONIFEROS DEL AREA HERCINICA DE SIERRA MORENA

Por A. APARICIO (\*), R. GARCIA (\*) y J. M. BRELL (\*\*)

## RESUMEN

Se definen las características del metamorfismo regional hercínico que afecta a los materiales carboníferos de Sierra Morena así como sus relaciones con las series Devónicas y del Paleozoico Inferior. Se analiza la influencia del metamorfismo de contacto producido por intrusiones plutónicas.

*Palabras clave:* Metamorfismo regional, muy bajo grado. Metamorfismo de contacto. Sierra Morena (España).

## ABSTRACT

The characteristics of the Hercynian regional metamorphism in carboniferous samples of Sierra Morena are described, so as the relationships with the Devonian and Lower Paleozoic materials. The influence of contact metamorphism on regional metamorphism is also analyzed.

*Key words:* Regional metamorphism, very low grade. Contact metamorphism. Sierra Morena (España).

## INTRODUCCION

Los principales afloramientos carboníferos del área Hercínica en Sierra Morena se sitúan según amplias bandas paralelas al batolito de Los Pedroches y en la cuenca de Peñarroya-Pueblonuevo. Los límites de este carbonífero lo constituyen los materiales plutónicos de Los Pedroches y de Villaviciosa de Córdoba y las series devónicas, igualmente extensas, que se localizan, en concordancia estructural con el carbonífero, al Norte y Sur de Los Pedroches (Fig. 1).

En una primera estimación de estos carboníferos (Pérez Lorente 1979) se les asignó una edad similar (Carbonífero Inferior) pero posteriores estudios (Pérez Lorente y Gabaldón 1983, Gabaldón

et al. 1985a, 1985b) han podido demostrar que el Carbonífero de Los Pedroches presenta una edad inferior Viseense-Namuriense mientras que la cuenca Peñarroya-Pueblonuevo correspondería al Westfaliense B.

La baja intensidad del metamorfismo regional que afectó a estas series devónico-carboníferas ha hecho que sean escasos los trabajos sobre las características y condiciones del metamorfismo que las afecta. Sánchez Cela y Gabaldón (1977) indican condiciones anquizonales y Orviz et al. (1976) hablan de un ligero metamorfismo regional. Para otros autores (Mira et al. 1987) el metamorfismo regional es inexistente o bien se alcanza la facies de Esquistos verdes (Castelló y Orviz 1976).

La intrusión de materiales plutónicos (Aparicio et al. 1977) sobre estas series ha superpuesto un metamorfismo de contacto que se manifiesta en la formación de pizarras mosqueadas y corneap-

(\*) Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

(\*\*) Dpto. Estratigrafía. Universidad Complutense. 28040 Madrid.

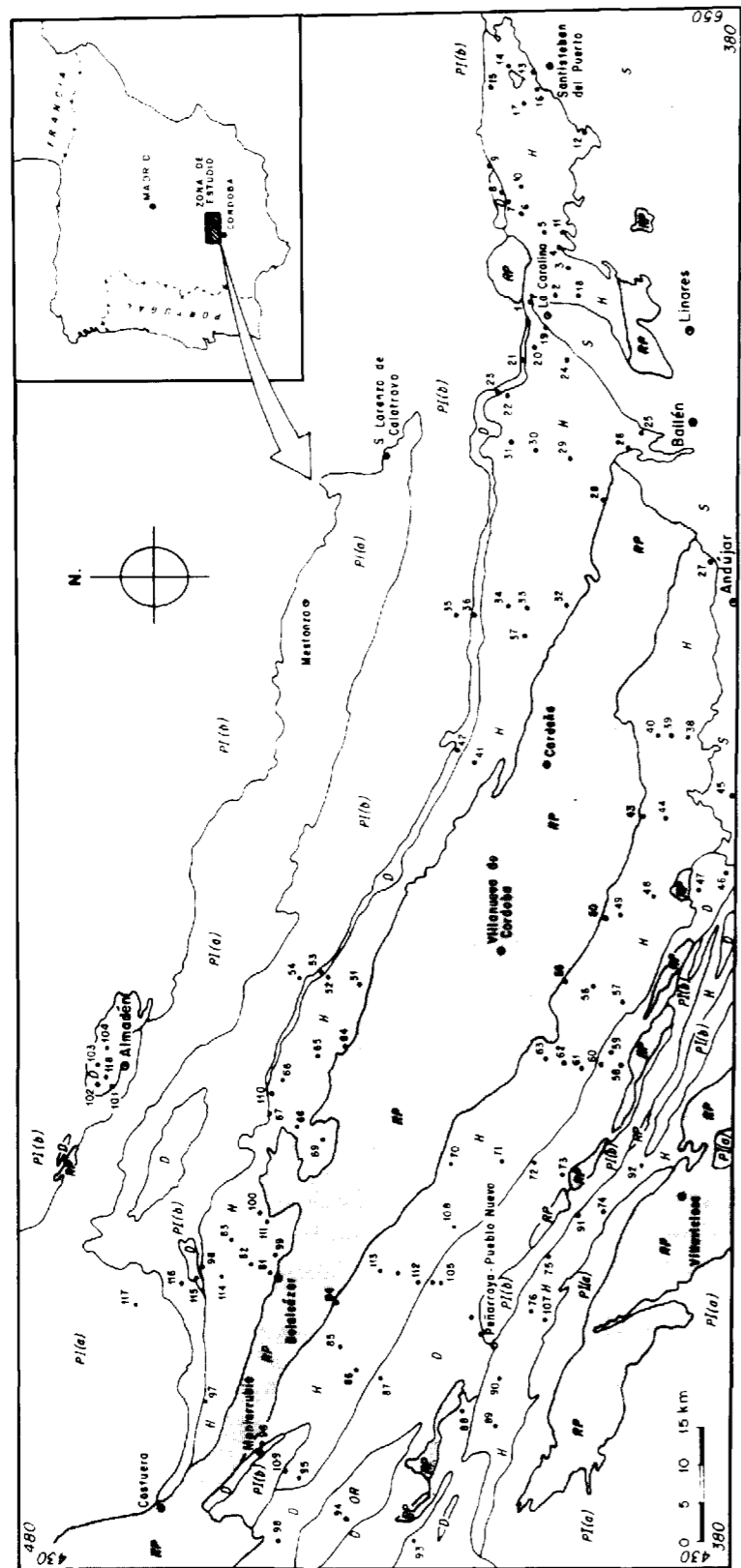


Fig. 1.- Esquema geológico del área estudiada con la situación de las muestras analizadas P1 = Paleozoico Inferior, D = Devónico, H = Carbonífero, RP = Rocas Plutónicas, S = Sedimentos.

nas que ha enmascarado, al menos en áreas próximas a los contactos, las características de este metamorfismo regional. Se ha intentado por ello incluir áreas devónico-carboníferas en las que las rocas plutónicas no esten, al menos, aflorantes en superficie, y el metamorfismo de contacto no interfiera en el proceso metamórfico regional.

Con estos criterios se seleccionaron un total de 118 muestras correspondientes al Carbonífero y Devónico, aunque a efectos comparativos se incluyen también algunas muestras del paleozoico inferior y otras muestras del Carbonífero afectadas por metamorfismo de contacto en las que es patente la textura mosqueada. Sobre estas muestras se hicieron determinaciones de las paragénesis y de los diferentes parámetros químicos estructurales. Para ello se utilizaron técnicas de DRX y de microscopía óptica. Las difracciones se realizaron en polvo total, A.O. (E.G. 550). Las características de los equipos y las condiciones de medida pueden encontrarse en Aparicio et al. (1988) y Kirsch (1991).

De esta manera se obtuvieron los valores de índice de cristalinidad de la illita (IC) de Kubler (1968), índice de Weaver (1960), politipo de moscovita, índice de paragonitización,  $b_0$ , ... etc. Para la determinación del  $b_0$  se utilizaron muestras cortadas perpendicularmente a la esquistosidad, aunque en algunos casos no pudo determinarse.

En la Fig. 1 se indica la localización de las muestras y su distribución en las diferentes unidades estratigráficas. En la Tabla 1 se describen las paragénesis encontradas y los parámetros descritos anteriormente.

PARAMETROS METAMORFICOS

El diagrama de Esquivín (1969) para la totalidad de las muestras (Fig. 2), indica que la mayor concentración de valores de IC corresponde a facies epizonales en rocas del Carbonífero, en contraste con el Devónico cuyos valores se sitúan mayoritariamente en los campos anquizonal y diagenético.

Si tenemos en cuenta los valores medios se comprueba que el Carbonífero presenta valores de

IC (3,91) sensiblemente inferiores al Devónico (5,47).

Dentro del Carbonífero, la distinción entre pizarras afectadas por el metamorfismo de contacto (mosqueadas) y las no afectadas resulta llamativa, así se puede observar en la Fig. 2 unos valores medios de IC, para las rocas mosqueadas de 2,88 en contraste con el 3,91 para las no mosqueadas, determinando una mayor intensidad del metamorfismo de contacto en las rocas carboníferas en comparación con el metamorfismo regional que las afecta.

En conjunto (excluyendo las muestras con fenómenos de contacto) se manifiesta la mayor intensidad metamórfica del Carbonífero en comparación con el Devónico, mostrando una inversión metamórfica entre materiales superpuestos estratigráficamente.

De las dos lineaciones carboníferas estudiadas, la correspondiente a la cuenca de Peñarroya-Pueblonuevo presenta unos valores de IC sensiblemente superiores a los de la lineación de Los Pedroches, con valores medios de IC pasando de 7,18 a 3,69 respectivamente.

En el Devónico una situación similar se encuentra entre las lineaciones que se sitúan próximas al eje del batolito de Los Pedroches y el Devónico correspondiente al sinclinal de Almadén; alejado, al menos en superficie, de intrusiones masivas de rocas plutónicas. En este caso la diferencia en los valores medios varía de 5,47 a 7,8 respectivamente.

Si analizamos conjuntamente estos datos con los valores medios del IC en las muestras del paleozoico inferior (Tabla 1), que se sitúan en 5,10, resultan inferiores a los del Carbonífero de Peñarroya-Pueblonuevo y Devónico de Almadén pero superiores a los obtenidos en el Devónico-Carbonífero asociado al batolito de Los Pedroches, indicando igualmente una inversión de la intensidad metamórfica entre estos últimos materiales y el paleozoico inferior.

Esta situación se refleja positivamente en la Fig. 2 en la que las rocas epizonales corresponden casi en su totalidad al Carbonífero constituido



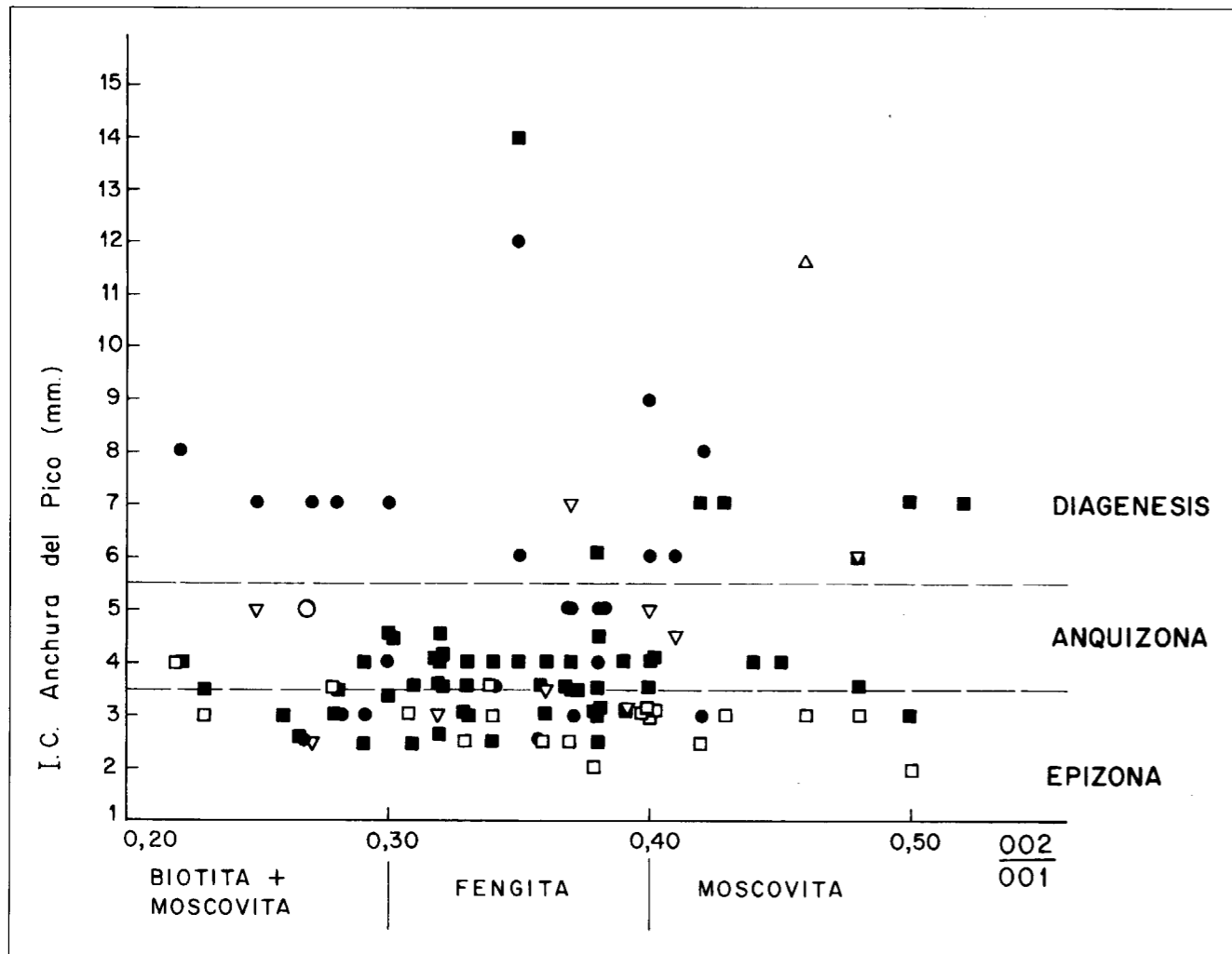


Fig. 2.- Diagrama de Esquevin (1969) con la variación del índice de cristalinidad de la ilita (IC), para la totalidad de las muestras estudiadas.

○ Cámbrico, ▽ Ordovícico, Δ Silúrico, ● Devónico, ■ Pizarras Carbonífero, □ Corneanas Carbonífero.

La determinación del  $b_0$  como un factor indicativo de la presión a que han estado sometidos los materiales metamórficos fue descrito por Sassi y Scolari (1974).

Los valores obtenidos para los materiales carboníferos y devónicos estudiados (Tabla 1) son característicos de metamorfismos de baja presión (BP), observándose que son coincidentes con los de otras áreas metamórficas de características análogas analizadas por Sassi y Scolari (1974) (fig. 4). En el gráfico se exponen por separado los valores acumulados de  $b_0$  en muestras del Devónico y del Carbonífero. Un ligero aumento de la presión parece apreciarse en el

Devónico con respecto al Carbonífero. Los valores medios de  $b_0$  expresan esta diferencia (8,9912 en el Carbonífero a 8,9985 en el Devónico). Igualmente resulta significativo que los valores medios de  $b_0$  en las pizarras mosqueadas (8,988) son algo inferiores a los encontrados en las no mosqueadas (8,9926) y que estos valores en conjunto sean inferiores a los encontrados en las muestras carboníferas de la cuenca Peñarroya-Pueblonuevo (8,9976) alejada ya de la influencia de intrusiones plutónicas.

La distribución superficial del  $b_0$  para el área estudiada (Fig. 5), sin las muestras mosqueadas, muestra bajos valores en el área próxima al bato-

Tabla 1  
Paragénesis y parámetros metamórficos en muestras del Paleozoico de Sierra Morena  
Muestras del Carbonífero inferior afectadas por metamorfismo de contacto

Muestra	Feldespatos										Otros	Kubler	Weaver	060	00.10	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Moscovita	$b_0$	Temper.
	Cuarzo	Filosil.	K	Ca-Na	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esmect.	Interest.											
20B	21	74	5	-	-	12	-	88	-	-	Bi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360
26	27	73	-	-	-	60	40	-	-	-	-	2,5	4	1,497	1,995	0,42	0,51	100%2MI	-	8,982	200-300
28	15	85	-	-	-	88	-	-	-	I-E 12	-	3	5,5	1,500	1,995	0,48	0,45	100%2MI	-	-	280
32	25	75	-	-	-	70	-	-	-	Cl-V 30	-	3,5	4,9	1,501	1,995	0,34	0,42	100%2MI	-	-	200
39	28	72	-	-	-	100	-	-	-	-	-	3	8,1	1,498	2,000	0,46	0,40	100%2MI	-	8,988	<510
41A	30	70	-	-	-	90	-	-	-	Cl-V 10	Bi	2,5	6,3	1,496	1,990	0,33	0,52	100%2MI	0,25	-	360
43	19	81	-	-	-	100	-	-	-	-	Bi And	4	3,5	1,499	1,989	0,22	0,39	100%2MI	0,30	-	<510
50	18	82	-	-	-	86	-	-	-	Cl-V 14	Bi And	3	5,2	1,499	1,993	0,40	0,44	100%2MI	-	8,994	<510
55	22	72	-	6	-	65	-	35	-	-	Bi And	2	3,4	1,498	1,995	0,50	0,38	100%2MI	-	8,988	<510
63	16	84	-	-	-	84	-	16	-	Cl-V indic	-	3	2,3	1,498	1,999	0,34	0,48	100%2MI	-	8,994	275
64	27	73	-	indic	-	95	-	-	-	Cl-E 5	Bi And	3,5	3	1,499	1,995	0,28	0,56	100%2MI	-	-	<510
68	30	70	-	-	-	82	-	-	-	Cl-V 8	Cl-V 10	3	5,4	1,498	1,994	0,40	0,55	100%2MI	-	8,988	230
69	42	53	-	5	-	73	-	10	12	Cl-V 5	-	3	4,7	1,498	1,993	0,43	0,53	100%2MI	-	-	300
81	26	69	-	5	-	55	-	20	-	Cl-V 25	Bi	2	5,4	1,498	1,995	0,38	0,46	100%2MI	-	8,982	360
84	23	77	-	indic	-	65	-	25	-	Cl-V 10	-	3	5,1	1,498	1,995	0,23	0,55	100%2MI	-	8,988	275
99	20	80	-	indic	-	70	-	-	-	Cl-V 30	Bi	2,5	6,6	1,498	1,996	0,36	0,52	100%2MI	-	8,988	360
100	23	72	-	5	-	93	-	-	-	Cl-V 7	Bi	2,5	5,7	1,498	1,993	0,37	0,48	100%2MI	-	8,988	360
111	12	88	-	indic	-	94	-	-	-	Cl-V 6	Bi	3	5,7	1,498	1,994	0,40	0,40	100%2MI	-	8,988	360

Tabla 1  
Paragénesis y parámetros metamórficos en muestras del Paleozoico de Sierra Morena  
Muestras del Carbonífero (Westfaliense B) de la cuenca Peñarroya-Pueblonuevo

Muestra	Feldespatos										Otros	Kubler	Weaver	060	00.10	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Moscovita	$b_0$	Temper.
	Cuarzo	Filosil.	K	Ca-Na	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esmect.	Interest.											
74	12	82	-	6	-	80	-	-	-	Cl-V 20	-	7	2	1,500	1,993	0,52	0,36	100%2MI	-	9,000	275
75	19	81	-	indic	-	75	-	-	-	Cl-V 20	I-E 5	7	1,9	1,500	1,995	0,43	0,43	100%2MI	-	9,000	180
76	16	77	-	7	-	74	-	26	-	-	-	7	1,89	1,499	1,995	0,50	0,44	100%2MI	-	8,994	300
89	20	75	-	5	-	84	-	11	-	Cl-V 5	-	7	2,1	1,500	1,991	0,42	0,48	100%2MI	0,20	9,000	275
90	15	85	-	indic	-	77	-	6	-	Cl-V 17	-	6	2,2	1,499	1,997	0,48	0,33	100%2MI	-	8,994	275
91	17	83	-	-	-	82	18	-	-	-	-	6	2,1	1,500	1,998	0,38	0,39	100%2MI	-	-	200
92	21	79	-	-	-	85	5	-	-	E 10	-	14	-	1,497	1,995	0,35	0,36	100%2MI	-	-	200
107	23	71	-	6	-	67	-	18	-	Cl-V 15	-	3,5	3,2	1,499	1,995	0,28	0,45	100%2MI	-	-	275

**Tabla 1**

Paragénesis y parámetros metamórficos en muestras del Paleozoico de Sierra Morena  
Muestras del Devónico

Muestra	Feldespatos											Temper.									
	Cuarzo	Filosil.	K	Ca-Na	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esmect.	Interestr.	Otros		Kubler	Weaver	060	00.10	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Moscovita	b <sub>0</sub>
8	8	92	-	-	-	55	6	10	-	-	Pirofil. 29	5	3,3	1,499	1,998	0,37	0,45	100%2MI	-	-	320
46	19	76	-	5	-	95	-	-	-	Cl-V 5	-	3	6,5	1,501	1,995	0,42	0,46	100%2MI	-	9,006	360
47	31	69	-	indic	-	65	-	35	-	-	-	2,5	6,5	1,501	1,993	0,27	0,52	100%2MI	-	9,006	300
53	15	85	-	-	-	82	-	-	-	-	Pirofil. 18	6	2,4	1,496	1,996	0,40	0,34	100%2MI	-	-	225
58	28	72	-	indic	-	92	-	-	-	Cl-V 8	-	6	4,8	1,500	1,998	0,41	0,44	100%2MI	-	9,000	275
59	18	82	-	-	-	88	-	-	-	Cl-E 12	-	4	2,8	1,498	1,994	0,38	0,36	100%2MI	-	8,994	230
60	19	76	5	-	-	100	-	-	-	-	-	7	1,7	1,498	1,995	0,27	0,37	100%2MI	-	8,988	250
72	10	90	-	-	-	100	-	-	-	-	-	6	2,5	1,501	1,995	0,35	0,40	100%2MI	-	9,006	190
73	11	84	-	5	-	95	-	-	-	Cl-V 5	-	5	2,4	1,501	1,996	0,38	0,33	100%2MI	-	9,006	275
77	20	74	-	6	-	78	-	8	-	Cl-V 14	-	2,5	5,2	1,499	1,999	0,36	0,42	100%2MI	-	-	275
78	17	83	-	indic	-	92	-	-	-	Cl-V 8	-	3	4,5	1,501	1,993	0,37	0,42	100%2MI	-	9,006	275
79	27	73	-	-	-	100	-	-	-	-	-	4	3,4	1,497	1,998	0,30	0,40	100%2MI	-	-	200
87	18	82	-	-	-	71	-	-	-	Cl-V 8	Pirofil. 21	5	2,3	1,495	1,995	0,37	0,42	100%2MI	-	-	275
88	25	71	-	4	-	84	-	-	-	Cl-V 16	-	3,5	4,5	1,500	1,997	0,34	0,37	100%2MI	-	9,000	275
93	20	80	-	-	-	95	-	-	-	Cl-V 5	-	5	2,4	1,489	1,995	0,38	0,50	100%2MI	-	9,024	225
94	6	94	-	-	-	87	-	-	-	Cl-E 13	Cl-V indic	11,6	3,8	1,506	1,987	0,46	0,49	100%2MI	0,45	-	230
105	22	78	indic	indic	-	65	-	22	-	Cl-V 13	-	3	7,2	1,499	1,998	0,28	0,50	100%2MI	-	-	275
106	9	91	-	-	-	78	6	-	-	-	Pirofil. 16	3	6,7	1,496	1,992	0,29	0,45	100%2MI	0,10	-	300
115	6	94	-	-	-	55	14	-	-	-	Pirofil. 31	12	1,8	1,499	1,995	0,35	-	100%2MI	-	-	225
116	7	93	-	-	-	78	indic	-	-	-	Pirofil. 22	7	1,7	1,496	1,993	0,28	0,47	100%2MI	-	8,976	225

**Tabla 1**

Paragénesis y parámetros metamórficos en muestras del Paleozoico de Sierra Morena  
Muestras del Devónico de Almadén

Muestra	Feldespatos											Temper.									
	Cuarzo	Filosil.	K	Ca-Na	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esmect.	Interestr.	Otros		Kubler	Weaver	060	00.10	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Moscovita	b <sub>0</sub>
101	17	83	-	-	-	79	5	-	-	-	Pirof. 16	7	2	1,492	1,995	0,25	0,36	100%2MI	-	-	225
102	14	86	-	-	-	100	-	-	-	-	-	8	1,8	1,498	1,997	0,42	0,32	90%2M	-	8,988	200
103	15	85	-	-	-	92	-	-	-	Cl-V indic	Pirof. 8	7	2	1,494	1,995	0,30	0,32	90%2M	-	-	225
104	11	89	-	-	-	100	indic	-	-	-	-	9	1,6	1,496	1,995	0,40	0,34	100%2M	-	-	200
118	5	95	-	-	-	76	5	-	-	-	Pirof. 19	8	1,8	1,493	1,995	0,22	0,45	100%2M	-	8,958	225

**Tabla 1**

Paragénesis y parámetros metamórficos en muestras del Paleozoico de Sierra Morena  
Muestras del Paleozoico Inferior

Muestra	Feldespatos											Temper.									
	Cuarzo	Filosil.	K	Ca-Na	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esmect.	Interestr.	Otros		Kubler	Weaver	060	00.10	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Moscovita	b <sub>0</sub>
9	21	79	indic	-	-	82	-	12	-	Cl-V 6	-	4,5	3,6	1,497	1,997	0,41	0,48	100%2MI	-	8,982	275
21	23	70	7	-	-	84	6	-	-	-	-	2,5	5,4	1,500	1,989	0,27	0,54	100%2MI	0,30	-	250
23	13	87	-	-	-	84	-	16	-	-	-	2,9	5	1,500	1,989	0,32	0,41	100%2MI	0,30	-	300
35	18	82	-	-	-	74	-	-	-	Cl-V 26	-	5	2,5	1,499	1,996	0,25	0,35	100%2MI	-	8,994	225
36	9	91	-	-	-	82	-	18	-	-	-	7	2	1,502	2,000	0,37	0,32	90%2MI	-	9,012	200
42	31	62	7	-	-	85	-	15	-	-	-	3,5	3,8	1,497	1,998	0,36	0,43	100%2MI	-	-	300
54	16	84	-	indic	-	89	-	-	-	Verm 11	-	6	2,2	1,499	1,991	0,48	0,42	100%2MI	0,20	8,994	275
67	33	67	-	-	-	100	-	-	-	-	-	5	2,2	1,497	1,989	0,40	0,38	100%2MI	0,30	-	200
109	30	70	-	-	-	88	12	-	-	-	-	3,2	5,4	1,496	1,995	0,39	0,49	100%2MI	-	-	275
117	16	76	-	5	-	72	-	28	-	-	-	5	2,9	1,502	1,999	0,27	0,48	11%2MI	-	9,012	300

Interestratificados: Cl-V = Clorita-Vermiculita Cl-E = Clorita-Esmectita I-E = Ilita-Esmectita

Bi = Biotita  
And = Andalucita  
Pir = Pirofilita  
Verm = Vermiculita

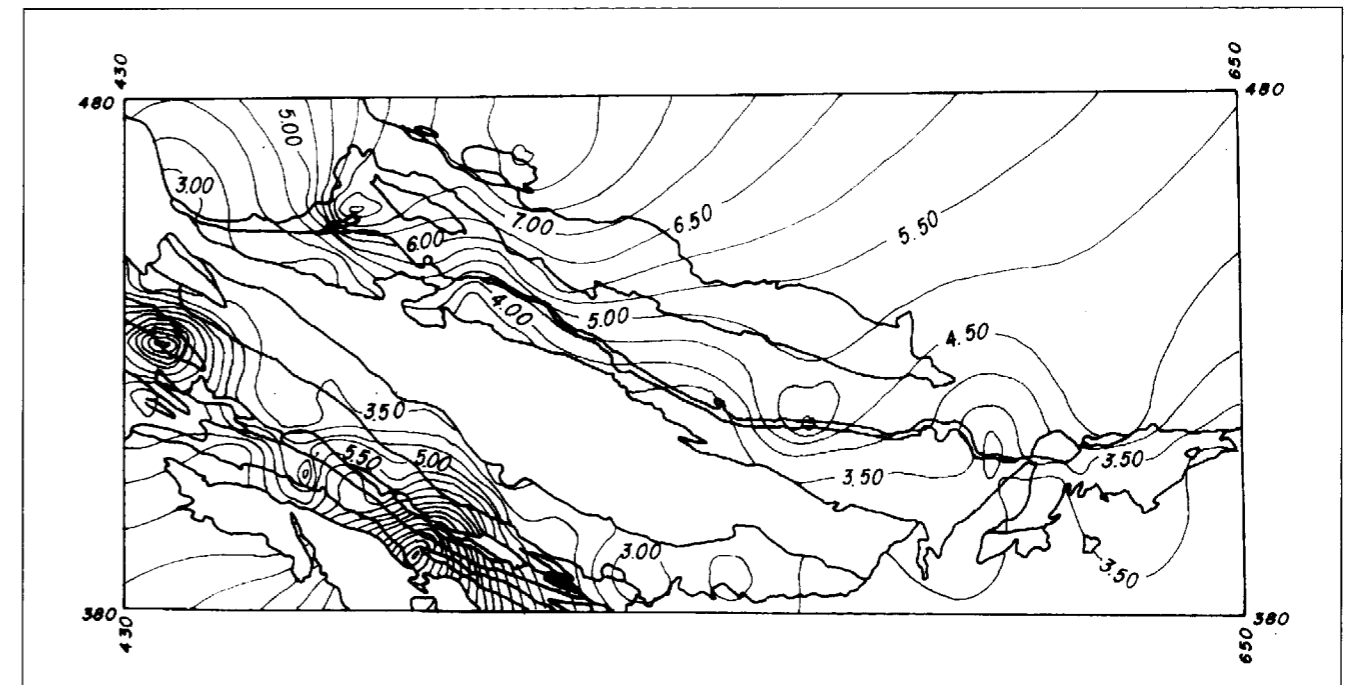


Fig. 3.- Esquema de distribución superficial del IC en el área estudiada.

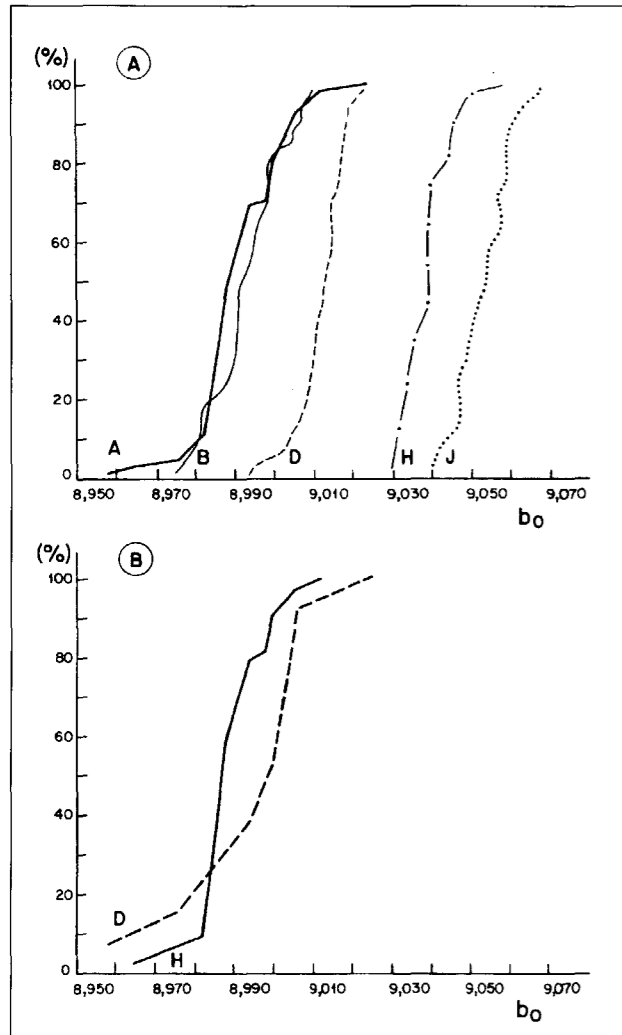


Fig. 4.- Curvas acumuladas del  $b_0$ .

a) Curva total de muestras del Carbonífero y Devónico del sector estudiado en comparación con otras áreas, según Sassi y Scolari (1974). A = (Sierra Morena), B = Bossot (Baja Presión), D = Ryoke (Baja Presión - Presión Intermedia), H = Otago (Presión Intermedia), J = Sanbagawa (Alta Presión).

b) Curvas acumuladas para el Devónico (D) y Carbonífero (H) del sector estudiado.

lito de Los Pedroches y en el Devónico de Almadén. Los máximos se sitúan según una banda al Sur del eje plutónico Pedroches y en el extremo NO del área estudiada.

La comparación de los esquemas de la Fig. 4, 5 pone de manifiesto una superposición entre los máximos y mínimos del  $b_0$  con los IC, es decir, las áreas con menor intensidad metamórfica reflejan mayores presiones, situación que puede ser

achacable, como ya se indicó anteriormente, a la perturbación producida en la evolución del metamorfismo regional por la intrusión de rocas plutónicas masivas.

#### PARAGENESIS Y CONDICIONES DEL METAMORFISMO REGIONAL

De los datos recogidos y establecidos en la Tabla 1 se deduce que no existen diferencias entre las paragénesis del Devónico y del Carbonífero en cuanto a los términos que podemos encontrar en rocas no afectadas por metamorfismo de contacto.

La asociación mineral más frecuente es  $Qz+Mo+Cl$  a la que frecuentemente se asocian interestratificados de  $Cl/V$  y feldspatos ( $Ab$  y  $FK$ ). Menos frecuente es la aparición de pirofilita, vermiculita, caolinita e interestratificados de  $Cl/E$  e  $I/E$ . La variedad de mica en casi todos los casos es 2M1 (100%) salvo en el Devónico de Almadén donde la variedad es 2M1 (90%). La variedad 2M1 indica para Frey (1987) que se alcanzan valores mínimos de  $150^\circ$ .

No se encuentra biotita por lo que no se debió alcanzar el límite inferior de estabilidad de este mineral ( $250^\circ$  a  $360^\circ$ ), ni tampoco el límite superior de estabilidad de la clorita ( $350^\circ$ ) (McMechan y Price 1982, McDowell y Elders 1980). En contraposición y en la zona de contacto de las rocas granodioríticas del plutón de Los Pedroches (Aparicio et al. 1977) las pizarras desarrollan biotita y andalucita en paragénesis de corneanas de albita-epidota con temperaturas próximas a los  $500^\circ$  (Winkler 1974). Cuarzo-ilita-clorita es una asociación estable a  $300^\circ$  y 2Kb (Velde 1964). La pirofilita se mantiene estable entre  $200-320^\circ$  y 2Kb (Bucher y Frey 1994, Velinov et al. 1983, Papezik Keats 1976, Frey 1987) y en nuestro caso, no aparece nunca asociada a clorita, por lo que el cloritoide no está presente en estas rocas, aunque sí se encuentra pirofilita asociada a caolinita, indicando márgenes de estabilidad inferiores a  $320^\circ$  y  $3\pm 1Kb$  (Theye y Siedel 1993).

Algunos interestratificados de  $Cl/V$  se mantienen hasta los  $300^\circ$  pero asociados a  $I/E$  no superan los  $275^\circ$  (Weaver et al. 1984). Las muestras con esmectita son escasas pero las paragénesis que

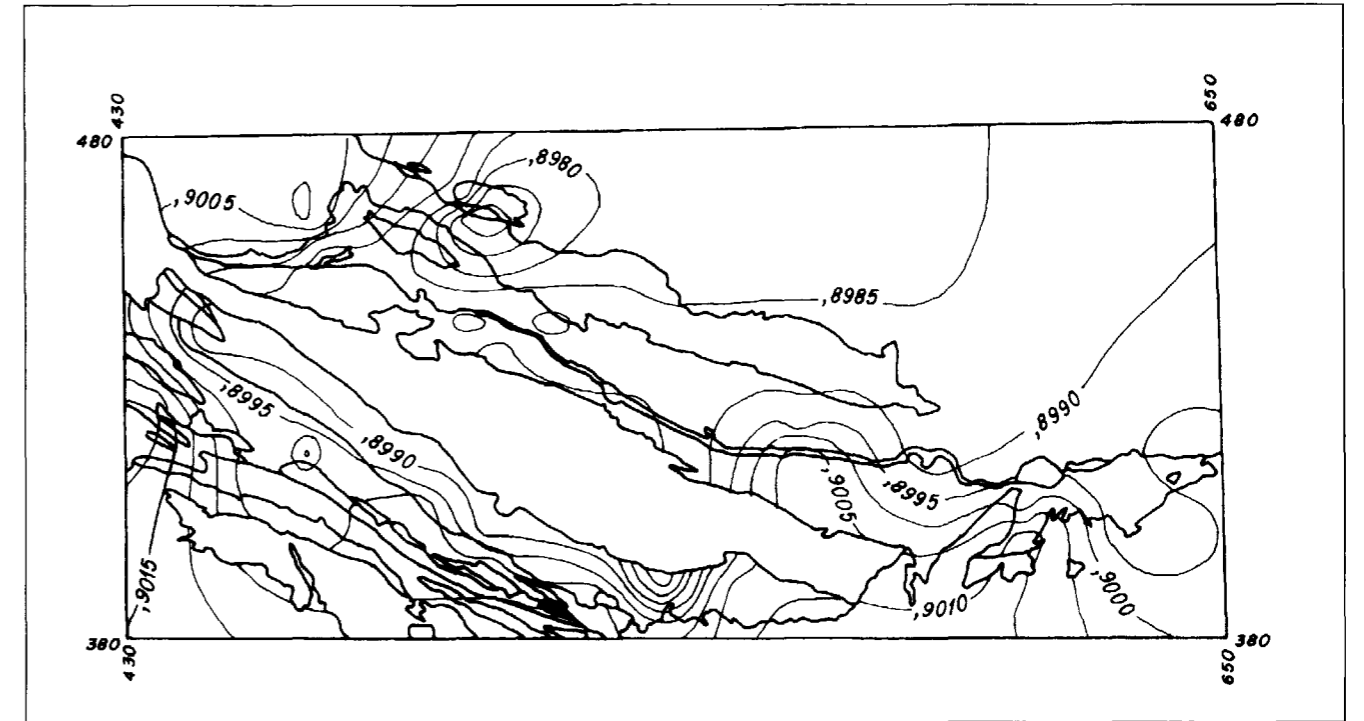


Fig. 5.- Distribución superficial del  $b_0$  en el área de Sierra Morena.

la incluyen corresponden a muestras que no han estado sometidas a temperaturas superiores a  $200^\circ C$  (Kristimansdóttir 1979, Yau et al. 1987). Los interestratificados de  $I/E$  tienen un límite de estabilidad superior, de  $280^\circ$  a BP (Paradis et al. 1983).

El conjunto de las paragénesis encontradas se situarían así en un margen de condiciones entre  $150$  y  $325^\circ$  con presiones  $< 2Kb$ . En la Tabla 1 se han expuesto de forma aproximada, teniendo en cuenta los límites de estabilidad de los minerales encontrados, las temperaturas que pueden reflejar estas asociaciones, dentro del ambiente de BP en el que nos encontramos. En algún caso se tomó como orientativa la intensidad del metamorfismo reflejada por el IC de la ilita.

El mapa de isotermas obtenido a partir de estos valores (Fig. 6), es pues sólo orientativo, pero expresa adecuadamente la variación de la intensidad metamórfica en el área estudiada. El mínimo térmico situado al Norte es coincidente con la posición del Devónico de Almadén mien-

tras que otros mínimos se sitúan sobre el Carbonífero de Peñarroya-Pueblonuevo. La isoterma de  $260^\circ$  situada en el área central limita el batolito de los Pedroches que está cortado al NO por un máximo  $> 300^\circ$  junto a otros máximos que bordean el contacto norte del batolito.

En general se observa que las isotermas obtenidas se mueven entre valores muy próximos de  $200-300^\circ$  y que estos límites se sitúan en valores anquizonales, con un cierto desfase respecto a lo indicado por los IC.

#### DISCUSION

El reconocimiento de un metamorfismo regional de bajo grado en las series Devónico-Carbonífero del sector Hespérico de Sierra Morena fue indicado por Sánchez Cela y Gabaldón (1977) y Orviz et al. (1976) aunque no establecen las características y condiciones del mismo. El principal problema de esta determinación surge de la super-

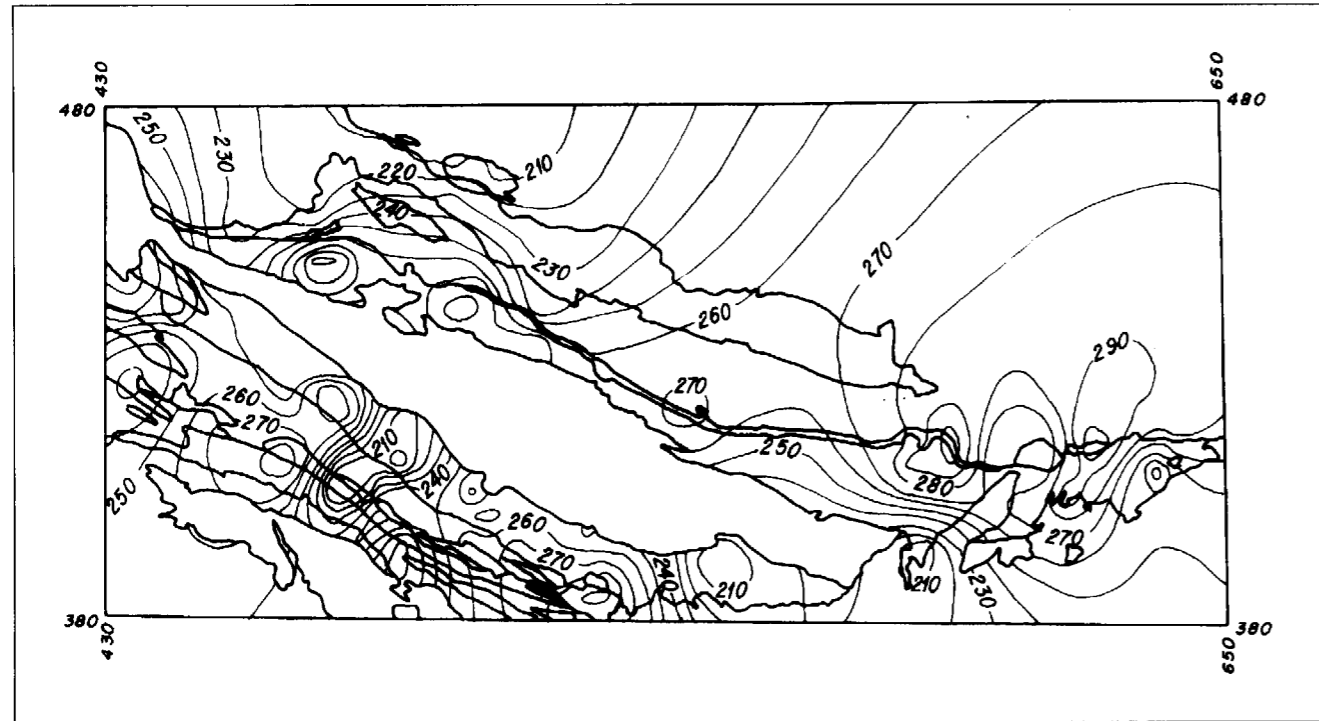


Fig. 6.- Isotermas deducidas de las paragénesis en las muestras analizadas.

posición del metamorfismo de contacto que al alcanzar mayor intensidad facilita la aparición de paragénesis específicas que enmascaran la exacta determinación del metamorfismo regional.

Un resultado llamativo radica en la diferencia encontrada entre la intensidad del metamorfismo en las secuencias Devónico-Carboníferas próximas al batolito central (Pedroches) y las más alejadas. Los IC muestran ya esta diferencia entre valores manifiestamente epizonales, en el área cercana al batolito, y anquizonales en el resto. A su vez estos valores de las series Devónico-Carboníferas más alejadas, se aproximan más a los valores determinados en muestras del paleozoico inferior analizadas, aunque siguen siendo más altas (menor intensidad metamórfica) que las de las próximas a los macizos graníticos. Como se indicó anteriormente las muestras con metamorfismo de contacto reflejan valores de IC muy bajos, aunque en ocasiones similares al de algunas muestras que aparentemente no han experimentado fenómenos de contacto, por lo que no es rechazable que la influencia de las

rocas intrusivas continúe hacia zonas más alejadas del batolito a través de apófisis próximas a la superficie que causarían una disminución del IC. De hecho la presencia de interestratificados de CI/V en toda la zona estudiada es un síntoma de este aumento térmico producido por intrusiones plutónicas (Merriman y Roberts 1985).

También interesa resaltar que no haya variación entre las características metamórficas del Devónico y Carbonífero presentando paragénesis idénticas, aunque pueden encontrarse causas de esta situación en la difícil delimitación de ambas series apreciable en algunos sectores del área estudiada. A este respecto, trabajos realizados en otras áreas Devónico-Carboníferas (García et al. 1992) ya explicaron esta situación atribuyéndola a la presencia de granitoides masivos no visibles en superficies.

El parámetro  $b_0$  delimita un campo de bajas presiones para el área considerada, lo que está de acuerdo con las paragénesis encontradas que corresponden a unas presiones inferiores a 2Kb. Por otro lado se observa que los valores de  $b_0$  de

los materiales devónicos son ligeramente inferiores a los del carbonífero, dato que estaría de acuerdo con su posición en la columna sedimentaria.

Algo distinto se manifiesta en el área metamórfica Devónica de Almadén en donde Saupé et al. (1977), describen un metamorfismo de diagénesis profunda y anquizonal. Este área define un aumento del IC y una disminución del  $b_0$  y temperatura en contraste con las otras áreas devónicas del sector. La presencia frecuente de pirofilita es una situación casi específica de este área de Almadén, aunque Sánchez Cela y Aparicio (1969) citan abundancia de pirofilita en las rocas carboníferas del límite oriental del batolito de Los Pedroches.

En comparación con el metamorfismo regional de la Faja Piritica, descrito por Aparicio et al. (1996), se observa que las paragénesis son similares tanto para el Devónico como para el Carbonífero, siendo igualmente constante la presencia de interestratificados de CI/V. Las condiciones de P y T resultan también muy próximas.

Como síntesis podemos así destacar la existencia de un fondo metamórfico regional, de muy bajo grado, que afectaría al conjunto de los materiales del sector, y sobre el que se superpone, un episodio térmico, asociado al magmatismo de Los Pedroches.

#### AGRADECIMIENTOS

A nuestros amigos y compañeros, A. Vilorio, M. Castillejo, M.C. Sendra, J. Arroyo, M.T. Montero por su ayuda en la elaboración del trabajo.

#### REFERENCIAS

- APARICIO A., BRELL J.M., GARCIA R. y GUARAS B. (1966). El metamorfismo hercínico de la faja piritica (provincias de Sevilla y Huelva). *Rev. Acad. Ciencias Zaragoza*. En prensa.
- APARICIO A., BARRERA J.L., CASQUET C., PEINADO M. y TINAO J.M. (1977). Caracterización geodinámica del plutonismo postmetamórfico del SO del Macizo Hespérico. *Studia Geologica*, 12, 9-39.

APARICIO A., BRELL J.M. y DOVAL M. (1988). El metamorfismo de los afloramientos paleozoicos de la Sierra de Rata, Albarración, Menera y Ventosa en la Cordillera Ibérica (Provincias de Guadalajara y Teruel). *Bol. Geol. Min.* 99, 847-854.

BUCHER K. y FREY M. (1994). *Petrogenesis of metamorphic rocks*, 6th edition. Springer Verlag. Berlin, 318 pp

CASTELLO R. y ORVIZ F. (1976). *Memoria Hoja Geológica 884. La Carolina*. ITGE. Madrid, 45 pp.

ESQUEVIN J. (1969). Influence de la composition des illites sur leur cristallinité. *Bull. Centre. Rech. Pau, SNPA* 3, 147-154.

FREY M. (1987). Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. En: *Low Temperature metamorphism*. Frey M. (ed.). Blackie ed. London, 9-57.

GABALDON V., GARROTE A., QUESADA C. (1985a). El Carbonífero Inferior del Norte de la zona de Ossa Morena (SO de España). *XI Congrès Intern. de Stratigraphie et de Geologie du Carbonifere*. Madrid 1983. *Compte Rendu*, 3, 173-186.

GABALDON V., GARROTE A., QUESADA C. (1985b). Geología del Carbonífero Inferior del Norte de la zona de Ossa Morena. Introducción a la excursión. *5ª Reunión Grupo Ossa Morena. Temas Geol-Min* 1985, 7, 101-137.

GARCIA R., BRELL J.M., APARICIO A. (1992). El metamorfismo del Paleozoico de la isla de Menorca (Islas Baleares). *Bol. Geol. Min.*, 103, 564-569.

KIRSCH H.J. (1991). Illite cristallinity: recomendations on sample preparation X-ray diffraction settings and interlaboratory samples. *J. Metamorphic Geology*, 9, 665-670.

KRISTMANSDO'TTIR H. (1979). Alteration of basaltic rocks by hidrothermal activity at 100-300°C. En: *International clay conference*. Morland M.M. y Farnen V.C. (eds.). Elsevier N. York, 410 pp.

KUBLER B. (1968). Evaluation quantitative de metamorphisme par la cristallinité de l'illite. Etat des progrès réalisés ces dernières années. *Bull. Centre Rech. Pau SNPA*, 2, 385-397.

MCDOWELL S.D., ELDERS W.A. (1980). Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California, USA. *Contr. Mineral. Petrol.* 74, 293-310.

MCMECHAN M.E., PRICE R.A. (1982). Superimposed low-grade metamorphism in the Mount Fisher area southeastern British Columbia implication for the East Kootenay Orogeny. *Can. J. Earth Sci.* 19, 476-489.

MERRIMAN R.J. and ROBERTS B. (1985). A survey of white mica cristallinity and polytypes in pelitic rocks of Snowdonia and Uyn, North Wales. *Min. Mag.* 49, 305-319.

- MIRA M., RODRIGUEZ PEVIDA L.S., ORTEGA GIRONES E. (1987). Memoria Mapa Geológico 834. San Benito ITGE. Madrid, 51 pp.
- ORVIZ F., CASTELLO R., MARTINEZ DEL OLMO W. (1976). *Memoria Mapa Geológico 885. Santisteban del Puerto*. ITGE. Madrid. 41 pp.
- PAPEZIK V.S., KEATS H.F. (1976). Diaspore in pyrophyllite deposit on the Avalon Peninsula, New foundland. *Can. Min.* 14, 442-449.
- PARADIS S., VELDE B., NICOT E. (1983). Chloritoid-Pyrophyllite-Rectorite facies rocks from Brittany, France. *Contr. Min. Petr.* 83, 342-347.
- PEREZ LORENTE F. (1979). *Geología de la zona Ossa-Morena al Norte de Córdoba (Pozoblanco-Bélmez-Villaviciosa de Córdoba)*. Tesis Doctoral. Univ. Granada, 281, 1-340.
- PEREZ LORENTE F., GABALDON V. (1983). The Lower Carboniferous of the Pedroches Valley. *X Congreso Internacional de Stratigraphie et de Geologie du Carbonifere*. Field Trip D, 23-31. Madrid.
- SANCHEZ CELA V., APARICIO A. (1969). Estudio petrológico de los afloramientos graníticos de Santa Elena y Linares (Jaén). *Bol. Geol. Min.* 80, 344-351.
- SANCHEZ CELA V., GABALDON V. (1977). *Memoria Mapa Geológico 831. Zalamea de La Serena*. ITGE. Madrid, 28 pp.
- SASSI F.P., SCOLARI A. (1974). The  $b_0$  value of the potassic white micas as a barometric indicator in low-grade metamorphism of pelitic schists. *Contr. Min. Petrol.* 45, 143-152.
- SAUPE F., DUNOYER DE SEGONZAÇ G., TEICHMÜLLER M. (1977). Etude du metamorphisme regional dans la zone d'Almaden (Province de Ciudad Real, Espagne) par la cristallinité de l'illite et par le pouvoir reflecteur de la matiere organique. *Sci Terre* (Nancy), 21, 251-269.
- THEYE T., SIEDEL H. (1993). Chloritoid, carpholite and sudoite in very low-grade metamorphic rocks of the Wippra Metamorphic zone (Harz, Germany). *N. Jb. Miner. Mh.* 2, 13-96.
- VELDE B. (1964). Low grade metamorphic of micas in pelitic rocks. *Carnegie Inst. wash. year 1963-1964*, b, 63, 142-147.
- VELINOV I., GOROVA M., TCHOLAKOV P., TCHOUNER D., IANEVA I. (1983). Secondary quartzites developed after Cretaceous volcanic from Zaza Zone, Cuba. *Geológica Balcánica*, 13, 6, 53-68.
- WEAVER C.E. (1960). Possible uses of clay minerals in search for oil. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 44, 1505-1518.
- WEAVER C.E., HIGHSMITH B., WAMPLER J.M. (1984). Chlorite. En: *Shale-slate metamorphism in Southern Appalachians*. C.E. Weaver (ed.). *Developments in Petrology* 10. Elsevier, 99-138.
- WINKLER G.F. (1974). *Petrogenesis of Metamorphic rocks*. Springer-Verlag. New York. 320 pp.
- YAU Y., PEACOR D.R., MCDOWELL S.D. (1987). Smectite to illite reactions in Salton Sea shales: A transmission and analytical electron microscopy study. *Journal of Sed. Petr.* 57, 335-342.

Original recibido: Septiembre 1996.

Original aceptado: Noviembre 1996.