

# High-pressure, low-temperature metamorphism in Alpujarride Units of southeastern Betics (Spain)

Guillermo Booth-Rea<sup>a,\*</sup>, José Miguel Azañón<sup>a</sup>, Bruno Goffé<sup>b</sup>, Olivier Vidal<sup>c</sup>,  
José Miguel Martínez-Martínez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dpto de Geodinámica, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, 18076 Granada, Spain

<sup>b</sup> Laboratoire de géologie, UMR 8538 CNRS, École normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris cedex 05, France

<sup>c</sup> LGCA, CNRS–université Joseph-Fourier, 1381, rue de la Piscine, BP 53, 38041 Grenoble cedex 09, France

Received 13 February 2002; accepted 23 April 2002

Presented by Michel Durand-Delga

**Abstract** – We present the first occurrences of high-pressure, low-temperature ferro-magnesiocarpholite-bearing mineral assemblages associated to quartz segregations in the Alpujarride units of southeastern Betics (Sierra de Almagro, Sierra de los Pinos and Sierra Cabrera). Thermobarometric results show that the carpholite-bearing rocks underwent the same  $P$ – $T$  conditions in the three outcrops, i.e. 8–10 kbar, 350–400 °C. Metamorphic and structural data allow us to conclude that these rocks belong to the same Alpujarride unit. In the Sierra de Almagro, tectonic units with carpholite-bearing rocks overlie low-pressure, low-temperature Alpujarride units, then forming a stack with an inverted tectono-metamorphic sequence, as observed in the central and western part of the Alpujarride complex. The preservation of carpholite-bearing assemblages in these rocks implies that no significant temperature increase occurred during the exhumation history. **To cite this article:** *G. Booth-Rea et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 857–865.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

thermobarometry / carpholite / Alpujarrides / southeastern Betics / Spain

**Résumé** – Métamorphisme de haute pression et basse température dans les unités Alpujarrides du Sud-Est de la cordillère Bétique (Espagne). Nous rapportons les premières occurrences d'associations métamorphiques de haute pression et basse température à ferro-magnésiocarpholite incluses dans des ségrégations synfoliaires de quartz dans les schistes des unités Alpujarrides, situées dans le Sud-Est de la chaîne Bétique (Sierra de Almagro, Sierra de los Pinos et Sierra Cabrera). Les estimations des conditions thermobarométriques montrent que ces associations à carpholite ont subi les mêmes conditions métamorphiques dans ces trois ensembles, autour de 350 à 400 °C et de 8 à 10 kbar. Les données métamorphiques et structurales permettent de montrer que ces roches appartiennent à la même unité Alpujarride. Dans la Sierra de Almagro, les unités à carpholite sont superposées à des unités Alpujarrides métamorphisées à basse température et basse pression, caractérisant ainsi le métamorphisme inverse déjà observé dans les Alpujarrides centrales et occidentales. L'excellente préservation des associations minérales de haute pression dans ces unités à carpholite suggère que les températures sont restées modérées au cours du retour des roches vers la surface. **Pour citer cet article :** *G. Booth-Rea et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 857–865.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

thermobarométrie / carpholite / Alpujarrides / Sud-Est de la cordillère Bétique / Espagne

## Version abrégée

### 1. Introduction

Le domaine crustal d'Alboran est le socle du bassin marin d'Alboran [17, 18, 23]. Il est constitué, de haut en

bas, par les complexes Malaguide, Alpujarride et Nevado-Filabride [9, 10]. Ces deux derniers ensembles ont été métamorphisés durant l'orogénèse alpine dans les conditions du faciès schistes bleus ou éclogitiques dans les premiers stades de l'évolution métamorphique [4, 7, 22, 24,

\* Correspondence and reprints.

E-mail addresses: gbooth@ugr.es (G. Booth-Rea),  
jazanon@ugr.es (J.M. Azañón), jmmm@ugr.es  
(J.M. Martínez-Martínez).

30, 39]. Le complexe Malaguide a, en revanche, seulement été affecté par un métamorphisme alpin de bas degré [26, 31].

Les associations métamorphiques à ferro- et magnésio-carpholite ont été décrites dans les unités Alpujarrides de la chaîne Bétique centrale et occidentale [3–5, 24] ainsi que dans les Sebtides [15]. Ces associations représentent des conditions de haute pression et basse température. Dans cet article, nous présentons les premières occurrences d'associations à carpholite dans la partie orientale de la chaîne Bétique, comme preuves de l'extension de ces conditions de haute pression, dans un secteur de la chaîne où le métamorphisme n'était pas décrit.

## 2. Contexte géologique

L'ensemble Alpujarride actuel résulte des charriages pré-aquitaniens [7, 11] ou aquitaniens [4], avec empilement d'unités de haut degré métamorphique sur des unités de bas degré. Cette succession inverse est une structure caractéristique de la chaîne Bétique, qui démontre l'existence de charriages post-métamorphiques [4, 7, 11]. Cet empilement a été fortement étiré durant le Miocène inférieur et moyen par des failles normales cassantes plates, de telle sorte que les contacts entre les unités sont maintenant des contacts extensifs [19, 23, 26–28].

Dans la région étudiée, le complexe Alpujarride est constitué par au moins trois unités tectoniques (Almagro, Almanzora et Variegato), superposées dans l'ordre ascendant [37, 38]. Les unités d'Almagro et d'Almanzora affleurent seulement dans le Nord du secteur étudié, dans la Sierra de Almagro. L'unité de Variegato, qui a été définie par Simon [37] dans la Sierra de Almagro, a été corrélée avec les unités Alpujarrides présentes dans la Sierra Cabrera [34].

Les carpholites ont été trouvées dans les schistes à grains fins de la Sierra de Almagro (échantillon w.alm.10), dans des klipptes de l'unité de Variegato reposant directement sur l'unité d'Almagro. Dans nombre de ces affleurements, l'unité de Variegato est formée de plusieurs écailles (deux ou trois), n'ayant chacune pas plus de 250 m d'épaisseur et constituées de la succession de schistes noirs graphiteux attribués au Paléozoïque, de schistes clairs du Permo-Trias et de carbonates du Trias [36]. Ces écailles, affectées par la tectonique extensive néogène, n'ont pas de continuité latérale.

Dans la Sierra Cabrera, les carpholites n'existent que localement, dans des affleurements situés aux limites sud-est et ouest des Alpujarrides, dans les restes de deux ou trois écailles de la base du complexe Alpujarride (échantillon w.mjc.1, Fig. 1). Vers le nord-est, dans la Sierra de los Pinos, on a également trouvé des carpholites (échantillon w.jv.1, Fig. 1) dans des schistes à grains fins, dans des écailles extrêmement amincies de l'unité de Ramonete [2] située à la base du complexe Alpujarride, dans une position structurale correspondant à celle de l'unité de la Sierra Cabrera.

## 3. Pétrographie et thermobarométrie

Les roches à carpholite étudiées sont des schistes et des quartzites contenant fréquemment des veines de quartz en forme de lentilles synfoliaires, parfois plissées en plis isoclinaux. L'association minérale dans ces veines est carpholite + chlorite + pyrophyllite + quartz  $\pm$  phengite (Fig. 2). Les carpholites constituent, dans ces veines, des fibres blanches à vert pâle, de quelques centimètres ou décimètres de long, ou des microfibrilles de quelques centaines de microns, incluses dans le quartz. Les chlorites, associées à la pyrophyllite, forment de longs cristaux parallèles aux fibres de carpholite, suggérant ainsi un équilibre entre les deux minéraux. Elles constituent également, en association avec des micas blancs, des textures de remplacement tardif de la carpholite (Fig. 2B).

Pour estimer les conditions métamorphiques correspondant à la croissance de ces associations à carpholite, nous avons utilisé la méthode des multi-équilibres [14], qui permet de calculer la position dans l'espace  $P$ - $T$  des différentes réactions intervenant entre les minéraux présents dans l'association. Pour effectuer ces calculs dans le système KMAH ( $K_2O$ - $MgO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ ) incluant toutes les phases décrites ci-dessus, nous avons utilisé le logiciel TWEAQ [14] et les modèles d'activité déterminés par Vidal et al. [40] pour les carpholites, Vidal et al. [41] pour les chlorites, Parra et al. [32] pour les micas blancs et Berman [13] pour les autres phases. La proportion des pôles purs dans les minéraux le long de la solution solide ferro-magnésienne est exprimée sous la forme  $X_{Mg}$  et  $X_{Fe}$ , avec  $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Mn)$  et  $X_{Fe} = Fe^{2+} / (Mg + Fe^{2+} + Mn)$ . Les compositions représentatives des minéraux index, comme les carpholites, les micas blancs K et les chlorites, sont présentées dans les Tableaux 1, 2 et 3, respectivement.

Les conditions ainsi estimées pour les schistes à grains fins contenant les carpholites se situent, pour la pression, entre 8 et 10 kbar, pour des températures variant de 330 à 460 °C (Fig. 3). Le fait que les carpholites soient très bien préservées suggère que le retour vers la surface, après le pic en pression, s'est effectué sans augmentation sensible de la température [40].

## 4. Discussion et conclusions

Les conditions métamorphiques identiques dans tous ces schistes à grains fins contenant des carpholites, dans les trois secteurs étudiés, nous incitent à les inclure dans une même unité tectonique du complexe Alpujarride. Cette unité, que nous appellerons unité de Variegato, en suivant la nomenclature de Simon [37], devait ainsi constituer une partie unique et homogène de la pile tectonique. Les résultats présentés ici montrent que les conditions de métamorphisme atteintes dans les séries permo-triasiques de l'unité de Variegato sont celles du faciès schistes bleus et qu'elles sont suivies par une décompression sans réchauffement. Ces résultats contredisent les connaissances antérieures sur cette région du Sud-Est de la chaîne Bétique, qui sous-estimaient les conditions du métamor-

phisme en les classant dans le bas degré du faciès schistes verts [42] ou à la limite du faciès schistes bleus [8]. Ces travaux admettaient aussi une rééquilibration thermique, ce qui n'est pas compatible avec la préservation de la carpholite [40].

Ces écailles de l'unité de Variegato reposent sur le Permo-Trias de l'unité d'Almagro, dont les conditions de

métamorphisme sont estimées autour de 4 kbar et 300 °C, conditions qui sont celles du faciès schistes verts [35]. Cette superposition anormale, associée à une inversion de la séquence métamorphique, suggère que ces ensembles ont été affectés par une tectonique en contraction tardive à post-métamorphique, avant la tectonique extensive cassante qui a eu lieu durant le *rifting* néogène.

## 1. Introduction

The Gibraltar Arc constitutes the western end of the Alpine peri-Mediterranean orogenic system. It is a highly arched orogenic system, formed by the Betics, Rif and Tell Chains, which are connected through the Gibraltar Straits. The internal part of the Arc is formed by the Alboran Crustal Domain, which presently constitutes the basement of both the Alboran Sea and the Neogene basins that outcrop in the Internal Betics [17, 18, 23]. The Alboran Crustal Domain is formed, in ascending order, by the Nevado-Filabride, the Alpujarride/Sebtide [21] and the Malaguide/Ghomaride [16] complexes, and by the Dorsal and Predorsal units [9, 10]. However, other authors interpret the Nevado-Filabride complex as a domain that constituted the distal parts of the Iberian margin, together with oceanic crust, during the Mesozoic [29]. The two lowest complexes underwent plurifacial metamorphism during the Alpine orogeny, registering first a high-pressure metamorphic event under eclogite or blueschist facies, then an intermediate or low  $P$ - $T$  gradient metamorphic event under granulite, amphibolite or greenschist facies [4, 7, 22, 24, 30, 39]. Meanwhile, the Malaguide Permo-Triassic sequences only underwent anchizonal metamorphism or diagenesis [26, 31].

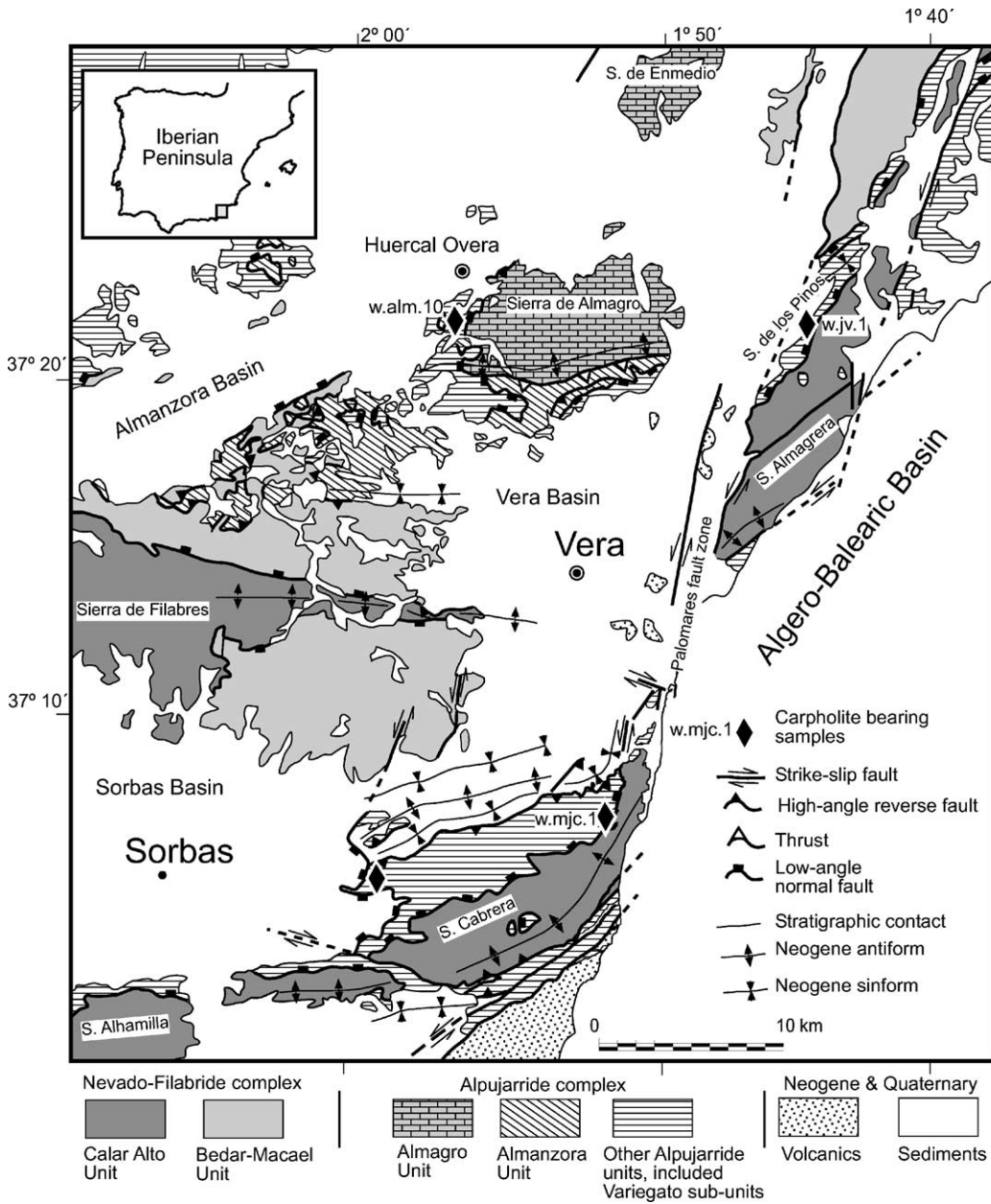
High-pressure, low-temperature metamorphic mineral assemblages including Mg-carpholite have been described in the Alpujarride units outcropping in the western and central Betics [3, 5, 7, 24] and in the Sebtides [15]. After this high-pressure metamorphic event, these Alpujarride units followed an isothermal exhumation  $P$ - $T$  path [3, 4, 7, 22, 39]. On the other hand, the Alpujarride units outcropping in the southeastern Betics have been described as reaching only lower-greenschist metamorphic facies [42], or lower-blueschist facies, like the Triassic metabasites of the Almanzora unit, in the Northern Sierra de los Filabres, which include sodic blue amphiboles, grown under  $P$ - $T$  conditions of approximately 7 kbar and 400 °C [8]. Bakker et al. [8] also described a late-heating event that affects the southeastern Betic Alpujarride units, during their exhumation path. Do these differences between the eastern and the western-central Alpujarride units really exist?

In this paper, we present the first occurrences of ferro-magnesiocarpholite-bearing assemblages in several of the Alpujarride complex outcrops of southeastern Betics, proving that carpholite occurs in some of the Alpujarride units at the scale of the Betic Chain.

## 2. Geological setting

In the Betic Cordilleras, the Alpujarride complex includes different nappes with similar lithostratigraphic sequences, although with variable thickness. When complete, an Alpujarride unit is typically formed, in ascending order, by gneisses and dark graphite schists (Palaeozoic protholites), light-coloured fine-grained schists and quartzites (Permo-Triassic protholites) and a thick Triassic carbonate sequence [1, 5, 20]. The Alpujarride complex constitutes the remnants of a pre-Aquitania or Aquitania thrust stack [4, 7, 11], which shows higher-grade metamorphic rocks overlying lower-grade ones. This inverted stacking order is a common feature of the Betics, which proves the existence of a late to post-metamorphic thrusting event [4, 6, 7, 11]. However, this thrusting event has been denied by other authors, who consider that after the high-pressure metamorphic event, the Alboran Domain was exhumed towards the surface by ongoing extensional tectonics [26, 33, 42]. The resulting thrust stack was submitted to extension during the Lower and Middle Neogene by brittle low-angle normal faults, so that the tectonic units are now bound by extensional contacts [5, 12, 19, 23, 27, 28]. Shortening occurred again during the Upper Neogene [43], forming large east-west-trending antiforms [28] that constitute in particular the present-day mountain ranges of the studied area of southeastern Betics (Fig. 1).

In the investigated area, the Alpujarride complex seems to be formed by three tectonic units, in ascending order the Almagro, Almanzora and Variegato units [37, 38], although Sanz de Galdeano and García-Tortosa [36] have proposed that the Almagro and Almanzora units constitute a single unit, based on their great stratigraphical similarity. The Almagro and Almanzora units only crop out in the north of the study area (Sierra de Almagro), while the Variegato unit [37,



**Figure 1.** Geological map of the study area.

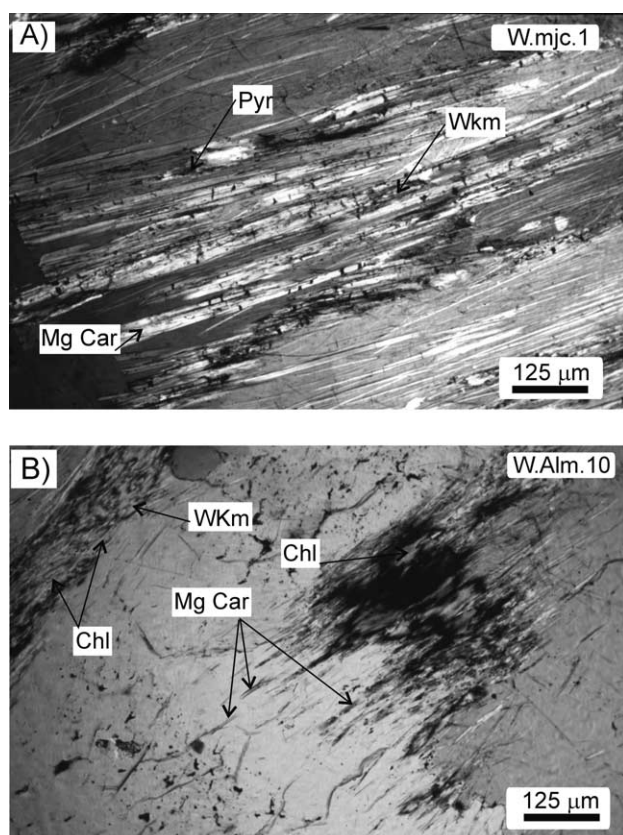
**Figure 1.** Carte géologique de la région étudiée.

38] would be also represented in the southern outcrops (Sierra Cabrera) [34].

The ferro-magnesiocarpholite-bearing fine-grained schists of Sierra de Almagro are found in klippen of the Variegato unit, above the Almagro unit (sample w.alm.10). Although the Variegato unit has been considered as a single tectonic unit [37], in most cases it is constituted by two or three minor thrust sheets (Variegato sub-units), no more than 250 m thick altogether, that include Permo-Triassic metapelites, Triassic carbonates, and locally, at the base of the highest Variegato sub-unit, garnet–biotite-bearing graphite schists [36]. These thrust-sheets lack lateral continuity, be-

cause of frequent tectonic omissions related with Neogene extensional tectonics.

In the Sierra Cabrera, carpholite-bearing rocks are found locally, in the southeastern and in the western end of the Alpujarride outcrops (sample w.mjc.1), where remnants of at least two Variegato sub-units with carpholite assemblages are preserved at the base of the Alpujarride complex. Towards the northeast, in the Sierra de los Pinos, the fine-grained carpholite-bearing schists are found also in two much-thinned thrust sheets, of the so-called Ramonete unit [2], at the base of the Alpujarride complex, in a structural position equivalent to that of Variegato sub-units of Sierra Cabrera.



**Figure 2.** A. Quartz vein from fine-grained schists of the Variegato unit with Mg-carpholite fibres altered to pyrophyllite and wKm. B. Quartz vein of the Variegato unit, lowest thrust sheet with Mg-carpholite microfibrils (Mg Car), altered to a chlorite (Chl) and wKm assemblage. Abbreviations: **pyr**, pyrophyllite; **wKm**, white K mica; **Mg Car**, Mg carpholite; **Chl**, chlorite.

**Figure 2.** A. Microphotographie de fibres de Mg-carpholite dans une veine de quartz des schistes à grains fins de l'unité de Variegato, partiellement remplacées par des associations à pyrophyllite et micas blancs. B. Microphotographie de fibres de Mg-carpholite dans une veine de quartz des schistes à grains fins de l'unité de Variegato, remplacées par des chlorites et micas blancs dans l'échelle la plus basse. Abréviations : **pyr**, pyrophyllite ; **wKm**, mica blanc K ; **Mg Car**, Mg carpholite ; **Chl**, chlorite.

### 3. Petrography and thermobarometry

The studied rocks are fine-grained schists and quartzites that frequently include synfolial, lense-shaped quartz veins. The mineral assemblages present in the quartz vein samples and selected for this study are carpholite + chlorite + pyrophyllite + quartz ± white K mica (wKm) (Fig. 2). Carpholite forms centimetre to decimetre-long white to greenish fibres, clearly observable in hand specimens and included in isoclinally folded quartz veins, or relic microfibrils inside the quartz veins. Chlorite shows two populations. Some chlorites form long crystals parallel to the carpholite fibres, showing equilibrium textures

**Table 1.** Representative mineral analyses and structural formulae (see text) for carpholite in samples from the Alpujarride fine-grained schists. See text for the Si and Fe<sup>3+</sup> calculation. Activity of Mg-carpholite is calculated as  $a_{\text{car}} = (X_{\text{Mg}})(X_{\text{Al}})^2(X_{\text{OH}})^4$  [40].

**Tableau 1.** Analyses et formules structurales représentatives des carpholites des schistes à grains fins des Alpujarrides orientales. Voir texte pour le mode de calcul de Si et Fe<sup>3+</sup>. L'activité de la Mg-carpholite est calculée selon la formule  $a_{\text{car}} = (X_{\text{Mg}})(X_{\text{Al}})^2(X_{\text{OH}})^4$  [40].

Mineral	Carpholite					
	Sample analysis	w.jrv.1 69	w.jrv.2 75	w.mjc.1 79	w.mjc.2 84	w.alm.10 17
SiO <sub>2</sub>	39.12	39.57	39.58	39.18	41.08	39.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.18	32.50	31.62	32.56	32.98	32.54
FeO	7.30	8.43	8.48	8.16	7.76	8.41
MnO	0.13	0.19	0.09	0.14	0.15	0.26
MgO	8.56	8.72	8.53	8.19	8.59	8.49
F	0.93	1.09	0.94	0.75	0.68	0.70
Summation	88.70	90.75	89.41	89.27	91.39	89.67
Si	1.885	1.852	1.878	1.861	1.909	1.839
Al	1.915	1.859	1.849	1.895	1.907	1.866
Fe <sup>3+</sup>	0.085	0.141	0.151	0.105	0.093	0.134
Fe <sup>2+</sup>	0.478	0.484	0.492	0.510	0.489	0.491
Mn	0.010	0.014	0.007	0.010	0.011	0.019
Mg	0.512	0.502	0.502	0.479	0.500	0.489
F	0.092	0.104	0.092	0.072	0.065	0.067
X <sub>Mg</sub>	0.512	0.502	0.502	0.479	0.500	0.489
a <sub>Mg</sub>	0.479	0.454	0.453	0.446	0.469	0.449

with carpholite. Other chlorites are found together with wKm as late alteration products of carpholite (Fig. 2B). Pyrophyllite forms small laths together with the carpholite + chlorite and the chlorite + wKm assemblages.

We used a multi-equilibrium method [14], calculating the position in the *P–T* space of the different reactions among the aforementioned mineral assemblages. The reaction curves intersect in the proximity of one *P–T* point when equilibrium is attained. To determine the stability fields of all the possible reactions between the present phases plus the wKm-chlorite end members, we have used the TWEEQ software of Berman [14] and activity models determined by Vidal et al. [40] for carpholite, Vidal et al. [41] for chlorite, Parra et al. [32] for wKm and Berman [13] for the remaining phases. The mineral analyses were performed with a Camebax electron microprobe at the University Paris-6.  $X_{\text{Mg}}$  in minerals is calculated as  $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$  and  $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$ . Representative compositions of the metamorphic index minerals carpholite, white K mica and chlorite are given in Tables 1, 2 and 3, respectively.

**Carpholite** formulae  $(\text{Mn,Fe,Mg})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$  are calculated on the basis of a fixed number of cations

**Table 2.** Representative mineral analyses and structural formulae for white K micas from the Alpujarride fine-grained schists.**Tableau 2.** Analyses et formules structurales représentatives des micas blancs des échantillons des schistes à grains fins des Alpujarrides orientales.

Mineral	White K micas					
	w.alm.10 analysis	w.alm.10 20	w.alm.10 5	w.alm.10 6	w.mjc.1 42b	w.jv.1 B43
SiO <sub>2</sub>	49.58	46.97	46.73	46.93	48.68	48.65
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.07	0.07	0.16	0.08	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.38	34.95	34.74	35.38	35.90	34.76
FeO	1.37	1.80	2.04	2.14	1.62	1.86
MnO	0.00	0.02	0.00	0.04	0.04	0.05
MgO	0.85	0.59	0.62	0.46	0.48	0.54
CaO	0.00	0.09	0.08	0.01	0.02	0.00
Na <sub>2</sub> O	1.09	1.28	1.30	0.84	0.79	0.68
K <sub>2</sub> O	8.85	8.73	8.71	9.10	8.94	8.53
F	0.98	0.06	0.06	0.21	0.21	0.17
Sum.	98.19	94.50	94.29	95.06	96.55	95.19
Si	3.158	3.129	3.124	3.114	3.158	3.196
Ti	0.003	0.003	0.004	0.008	0.004	0.006
Al	2.731	2.743	2.737	2.767	2.745	2.692
Al IV	0.839	0.868	0.872	0.878	0.838	0.798
Al VI	1.892	1.876	1.866	1.888	1.907	1.894
Fe <sup>2+</sup>	0.073	0.100	0.114	0.119	0.088	0.102
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.003
Mg	0.081	0.059	0.062	0.045	0.047	0.053
Ca	0.000	0.007	0.006	0.001	0.002	0.000
Na	0.134	0.166	0.168	0.109	0.100	0.087
K	0.719	0.742	0.743	0.770	0.740	0.715

(Table 1): five for the calculation of Si (considering all the elements), three for the calculation of Al, Fe, Mn and Mg (Si being ignored). This mode of calculation is used to avoid the effect of the contamination by surrounding quartz when calculating the Al, Fe, Mg and Mn content of carpholite microfibrils smaller than the microprobe-beam size [25]. Fe<sup>3+</sup> is calculated as 2-(Al + Ti). The carpholite composition varies from  $X_{Mg} = 0.37$  to  $X_{Mg} = 0.58$ . MnO is always very low (<0.5 wt%). The content of F is comprised between 1 and 0 wt%.

**White K mica** formulae (Table 2) are calculated on the basis of 11 oxygens with total iron as FeO. The Si content varies from 3.094 to 3.196 pfu in the Variegato fine-grained schists.

**Chlorite** formulae (Table 3) are calculated on the basis of 14 oxygens with total iron as FeO. Their composition varies from  $X_{Mg} = 0.80$  to 0.60 in the Variegato fine-grained schists. The Si content varies from 2.61 to 3.22 pfu in the Variegato fine-grained schists.

The thermobarometric results obtained with the TWEEQ software coincide with the petrogenetic

grid constraints that situate these samples in the pyrophyllite + chlorite + carpholite field, being devoid of kyanite (Fig. 3). The TWEEQ results show that the fine-grained schists have reached between  $8.2 \pm 0.5$  and  $10.0 \pm 0.1$  kbar, and between  $348 \pm 28$  and  $408 \pm 58$  °C (Fig. 3).

The fact that fresh carpholite is well preserved, being very sensitive to thermal reequilibration [40], and that no traces of andalousite or biotite have been found in these rocks, shows that these Alpujarride rocks have not suffered a later heating event, as proposed by Bakker et al. [8].

#### 4. Discussion and conclusions

The analysed fine-grained schists of the three studied outcrops show the same mineral assemblages, which have reached equivalent  $P$ – $T$  conditions. These data, together with the fact that these Alpujarride rocks occupy the same structural position, have decided us to include them in a same Alpujarride unit, for which we have retained the name of Variegato unit, from Simon [37]. The Almagro and Almanzora units have been omitted by extensional tectonics in the two most-southern outcrops.

The Variegato unit has been considered as a single Alpujarride tectonic unit [37], although the fact that it is constituted by three thin sub-units indicates that it represents the remnants of a previous thrust pile that has been strongly thinned during Neogene extensional tectonics.

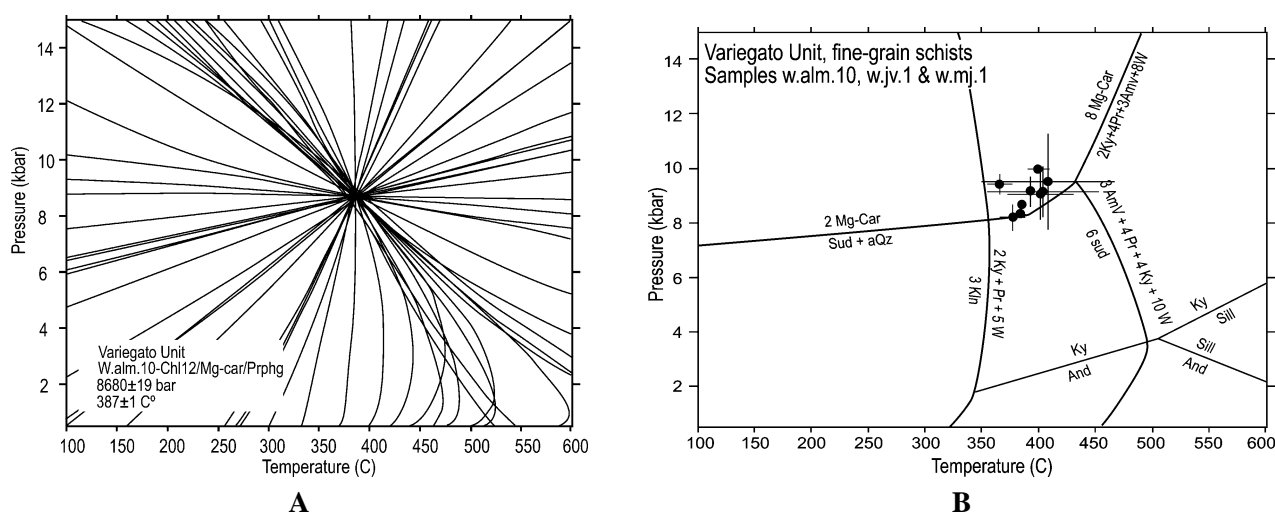
The Alpujarride complex outcropping in south-eastern Betics has been described as reaching only lower-greenschist metamorphic facies [42], or lower-blueschist facies [8]. Bakker et al. [8] describe a late-heating event that affects the Alpujarride units during their exhumation path. The fact that fresh carpholite is well preserved, being very sensitive to thermal reequilibration [40], and that no andalousite or biotite has been found precludes the possibility of this re-heating event in the Variegato sub-units.

The Variegato sub-units are found lying over the Almagro unit that has only reached lower-greenschist-facies metamorphism, at approximately 4 kbar and 300 °C [35]. Moreover, the Variegato sub-units show the superposition of garnet-biotite-bearing schists on the top of wKm-chlorite bearing fine-grained schists. Then, a late to post-metamorphic thrusting event, responsible for the inverted Alpujarride metamorphic sequence, occurred prior to the brittle extensional attenuation of the Alpujarride complex during the Neogene rifting.

**Table 3.** Representative mineral analyses and structural formulae for chlorite from the Alpujarride fine-grained schists.

**Tableau 3.** Analyses et formules structurales représentatives des chlorites des échantillons des schistes à grains fins des Alpujarrides orientales.

Mineral	Chlorite						
	Sample analysis	w.alm.10 12	w.alm.10 23	w.jv.1 56	w.jv.1 B55	w.mjc.1 B17	w.mjc.1 41b
SiO <sub>2</sub>		28.54	28.57	27.36	26.68	31.58	25.57
TiO <sub>2</sub>		0.01	0.03	0.10	0.00	0.07	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		24.92	25.25	26.07	25.69	33.71	23.88
FeO		11.39	11.46	15.61	18.73	10.35	17.31
MnO		0.02	0.19	0.04	0.04	0.17	0.20
MgO		24.71	24.27	19.60	16.66	11.96	17.80
Sum.		89.62	89.81	88.95	87.94	87.91	84.95
Si		2.735	2.707	2.671	2.679	2.956	2.657
Ti		0.001	0.002	0.007	0.000	0.005	0.004
Al		2.848	2.820	2.999	3.040	3.719	2.923
Al IV		1.263	1.292	1.322	1.321	1.039	1.339
Al VI		1.584	1.528	1.678	1.719	2.680	1.585
Fe <sup>2+</sup>		0.848	0.908	1.274	1.573	0.810	1.504
Fe <sup>3+</sup>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn		0.000	0.015	0.003	0.003	0.013	0.018
Mg		3.398	3.428	2.852	2.494	1.669	2.756
R2+		4.246	4.352	4.129	4.070	2.492	4.278
Oct. Sum.		5.848	5.884	5.833	5.810	5.180	5.881
X <sub>Mg</sub>		0.80	0.79	0.69	0.61	0.67	0.65



**Figure 3. A.** Thermobarometric results for the Alpujarride carpholite bearing fine-grained schists (samples w.alm.10, w.jv.1 and w.mjc.1). **B.** TWEEQ  $P$ – $T$  diagram for equilibrium between the phases Mg-carpholite + chlorite + wKm + water + quartz {four independent reactions} (sample w.alm.10, chlorite analysis 12).

**Figure 3. A.** Résultats des calculs thermobarométriques pour les schistes à grains fins à carpholite des Alpujarrides orientales (échantillons w.alm.10, w.jv.1 et w.mjc.1). **B.** Diagramme  $P$ – $T$  calculé avec le logiciel TWEEQ  $P$ – $T$  pour des équilibres entre Mg-carpholite + chlorite + wKm + eau + quartz {quatre réactions indépendantes} (échantillon w.alm.10, chlorite analyse 12).

**Acknowledgements.** The French–Spanish collaboration ENS–Granada University (PICASSO programme), the CICYT Spanish projects REN2001-3868-CO3-01/MAR, REN2001-3378 and FEDER funds of the EU supported the field and laboratory research.

## References

- [1] F. Aldaya, V. García-Dueñas, F. Navarro-Vilá, Los Mantos Alpujarrides del tercio central de las Cordilleras Béticas. Ensayo de correlación tectónica de los Alpujarrides, *Acta Geol. Hisp.* 14 (1982) 154–166.
- [2] F. Alvarez, Subhorizontal shear zones and their relation to nappe movements in the Cantal and Miñarros units, Eastern Betic Zone (Spain), *Geol. en Mijnbouw* 66 (1987) 101–110.
- [3] J.M. Azañón, B. Goffé, Ferro-magnesiocarpholite-kyanite assemblages as record of the high-pressure, low-temperature metamorphism in central Alpujarride units, Betic cordillera (SE Spain), *Eur. J. Mineral.* 9 (1997) 1035–1051.
- [4] J.M. Azañón, A. Crespo-Blanc, Exhumation during a continental collision inferred from the tectonometamorphic evolution of the Alpujarride Complex in the central Betics (Alboran Domain, SE Spain), *Tectonics* 19 (2000) 549–565.
- [5] J.M. Azañón, V. García-Dueñas, J.M. Martínez-Martínez, A. Crespo-Blanc, Alpujarride tectonic sheets in the central Betics and similar eastern allochthonous units (SE Spain), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 318 (1994) 667–674.
- [6] J.M. Azañón, A. Crespo-Blanc, V. García-Dueñas, M. Sánchez-Gómez, Folding of metamorphic isogrades in the Adra extensional unit (Alpujarride complex, Central Betics), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 323 (1996) 949–956.
- [7] J.M. Azañón, A. Crespo-Blanc, V. García-Dueñas, Continental collision, crustal thinning and nappe-forming during the Pre-Miocene evolution of the Alpujarride Complex (Alborán Domain, Betics), *J. Struct. Geol.* 19 (1997) 1055–1071.
- [8] H.E. Bakker, K. De Jong, H. Helmers, C. Bierman, The geodynamic evolution of the Internal Zone of the Betic Cordilleras (South-East Spain): a model based on structural analysis and geothermobarometry, *J. Metamorph. Geol.* 7 (1989) 359–381.
- [9] J.C. Balanyá, V. García-Dueñas, Grandes fallas de contracción y extensión implicadas en el contacto entre los dominios de Alborán y Sudibérico en el Arco de Gibraltar, *Geogaceta* 1 (1986) 19–21.
- [10] J.C. Balanyá, V. García-Dueñas, Les directions structurales dans le domaine d'Alborán de part et d'autre du détroit de Gibraltar, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 304 (1987) 929–932.
- [11] J.C. Balanyá, V. García-Dueñas, J.M. Azañón, M. Sánchez-Gómez, Alternating contractional and extensional events in the Alpujarride nappes of the Alboran Domain (Betics, Gibraltar Arc), *Tectonics* 16 (1997) 226–238.
- [12] J.C. Balanyá, V. García-Dueñas, J.M. Azañón, M. Sánchez-Gómez, Reply, *Tectonics* 17 (1998) 977–981.
- [13] R.G. Berman, Internally-consistent thermodynamic data for stoichiometric minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ , *J. Petrol.* 29 (1988) 445–522.
- [14] R.G. Berman, Thermobarometry using multi-equilibrium calculations – A new technique, with petrological applications, *Can. Mineral.* 29 (1991) 833–855.
- [15] M.-L. Boybaouène, B. Goffé, A. Michard, High-pressure, low-temperature metamorphism in the Sebides nappes, northern Rif, Morocco, *Geogaceta* 17 (1995) 117–119.
- [16] A. Chalouan, A. Michard, The Ghomarides nappes, Rif coastal range, Morocco: a variscan chip in the Alpine belt, *Tectonics* 9 (1990) 1565–1583.
- [17] M.C. Comas, V. García-Dueñas, M.J. Jurado, Neogene tectonic evolution of the Alboran Sea from Mcs data, *Geo-Mar. Lett.* 12 (1992) 157–164.
- [18] M.C. Comas, J.P. Platt, J.I. Soto, A.B. Watts, The origin and tectonic history of the Alborán Basin: insights from Leg 161 results, in: R. Zahn, M.C. Comas, A. Klaus (Eds.), *Proc. ODP Sci. Results* 161 (1999) 555–579.
- [19] A. Crespo-Blanc, Interference pattern of extensional fault systems: a case study of the Miocene rifting of the Alboran basement (North of Sierra Nevada, Betic Chain), *J. Struct. Geol.* 17 (1995) 1559–1569.
- [20] F. Delgado, A. Estévez, J.M. Martín, A. Martín-Algarra, Observaciones sobre la estratigrafía de la formación carbonatada de los Mantos Alpujarrides (Cordillera Bética), *Estud. Geol.* 37 (1981) 47–57.
- [21] W.P. Didon, M. Durand-Delga, J. Kornprobst, Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar, *Bull. Soc. géol. France* 7 (1973) 77–105.
- [22] A. García-Casco, R.L. Torres-Roldán, Disequilibrium induced by fast decompression in St-Bt-Grt-Ky-Sil-And metapelites from the Betic Belt (southern Spain), *J. Petrol.* 37 (1996) 1207–1239.
- [23] V. García-Dueñas, J.C. Balanyá, J.M. Martínez-Martínez, Miocene extensional detachments in the outcropping basement of the Northern Alboran Basin (Betics) and their tectonic implications, *Geo-Mar. Lett.* 12 (1992) 88–95.
- [24] B. Goffé, A. Michard, V. García-Dueñas, F. González-Lodeiro, P. Monié, J. Campos, J. Galindo-Zaldívar, A. Jabaloy, J.M. Martínez-Martínez, F. Simancas, First evidence of high-pressure, low-temperature metamorphism in the Alpujarride nappes, Betic Cordillera (SE Spain), *Eur. J. Mineral.* 1 (1989) 139–142.
- [25] B. Goffé, R. Oberhänsli, Ferro- and magnesiocarpholite in the 'Bündnerschiefer' of the eastern Central Alps (Grisons and Engadine window), *Eur. J. Mineral.* 4 (1992) 835–838.
- [26] L. Lonergan, J. Platt, The Malaguide–Alpujarride boundary: a major extensional contact in the Internal Zone of the eastern Betic Cordillera, SE Spain, *J. Struct. Geol.* 17 (1995) 1665–1671.
- [27] J.M. Martínez-Martínez, J.M. Azañón, Mode of extensional tectonics in the south-eastern Betics (SE Spain). Implications for the tectonic evolution of the peri-Alborán orogenic system, *Tectonics* 16 (1997) 205–225.
- [28] J.M. Martínez-Martínez, J.I. Soto, J.C. Balanyá, Orthogonal folding of extensional detachments: structure and origin of the Sierra Nevada elongated dome (Betics, SE Spain), *Tectonics* (in press).
- [29] A. Michard, A. Chalouan, H. Feinberg, B. Goffé, R. Montigny, How does the Alpine belt end between Spain and Morocco?, *Bull. Soc. géol. France* 173 (2002) 3–15.
- [30] L. Morten, G.M. Bargossi, J.M. Martínez-Martínez, E. Puga, A. Díaz de Federico, Metagabbro and associated eclogites in the Lubrín area, Nevado-Filabride Complex, Spain, *J. Metamorph. Geol.* 5 (1987) 155–174.
- [31] F. Nieto, N. Velilla, D.R. Peacor, M. Ortega-Huertas, Regional retrograde alteration of sub-greenschist facies chlorite to smectite, *Contrib. Mineral. Petrol.* 115 (1994) 243–252.
- [32] T. Parra, O. Vidal, P. Agard, A thermodynamic model for Fe–Mg dioctahedral K-white micas using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages, *Contrib. Mineral. Petrol.* (in press).
- [33] J.P. Platt, Comment on "Alternating contractional and extensional events in the Alpujarride nappes of the Alboran Domain (Betic, Gibraltar Arc)" by J.C. Balanyá et al., *Tectonics* 17 (1998) 973–976.
- [34] H.E. Rondeel, Geological investigations in the western Sierra Cabrera and adjoining areas, south-eastern Spain, PhD thesis, Amsterdam, 1965, 161 p.



[35] V.L. Sánchez-Vizcaino, M.T. Gómez-Pugnaire, J.M. Fernández-Soler, Petrological features of some Alpujarride mafic igneous bodies from the Sierra de Almagro (Betic Cordilleras, Spain), *Rev. Soc. Geol. Esp.* 4 (1991) 321–335.

[36] C. Sanz de Galdeano, F.J. García-Tortosa, Almagride versus Alpujarride in the Sierra de Almagro (Betic Cordillera, Spain), *C. R. Geoscience* (in press).

[37] O.J. Simon, Geological investigations in the Sierra de Almagro, southeastern Spain, Doctoral Thesis, Amsterdam, 1963, 164 p.

[38] O.J. Simon, On the Triassic of the Betic Cordilleras (southern Spain), *Cuad. Geol. Ib.* 11 (1987) 385–402.

[39] J.M. Tubía, J.I. Gil-Ibarguchi, Eclogites of the Ojén nappe: a record of subduction in the Alpujarride complex (Betic Cordilleras, southern Spain), *J. Geol. Soc. London* 148 (1991) 801–804.

[40] O. Vidal, B. Goffé, T. Theye, Experimental study of a new petrogenetic grid for the system  $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , *J. Metamorph. Geol.* 14 (1992) 381–386.

[41] O. Vidal, T. Parra, F. Trotet, A thermodynamic model for Fe–Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100–600 °C, 1–25 kbar  $P$ – $T$  range, *Am. J. Sci.* 301 (2001) 557–592.

[42] R.L.M. Vissers, J.P. Platt, D. van der Wal, Late Orogenic extension of the Betic Cordillera and the Alboran Domain: a lithospheric view, *Tectonics* 14 (1995) 786–803.

[43] R. Weijermars, T.B. Roep, B. Van den Eeckhout, G. Postma, K. Kleverlaan, Uplift history of a Betic fold nappe inferred from Neogene–Quaternary sedimentation and tectonics (in the Sierra Alhamilla and Almería, Sorbas and Tabernas Basins of the Betic Cordilleras, SE Spain), *Geol. en Mijnbouw* 64 (1985) 397–411.