



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 255–264



Tectonics / Tectonique

Joints, faults and palaeostress evolution in the Campo de Dalías (Betic Cordilleras, southeastern Spain)

Diaclases, failles et évolution des paléocontraintes dans le Campo de Dalías (Cordillères bétiques, Sud-Est de l'Espagne)

Carlos Marín^a, Jesús Galindo-Zaldívar^{b,*}, Luís Roberto Rodríguez-Fernández^a

^a Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil. Edificio Zulema, No. 4 Bajo CP, 18006 Granada, Spain

^b Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain

Received 19 June 2002; accepted 3 December 2002

Presented by Michel Durand-Delga

Abstract

The Campo de Dalías, located between the central and eastern Betic Cordilleras, shows an evolution determined by the overprinting of two main stress fields since Pliocene times. The first of these develops hybrid and tensional joint sets up to Pleistocene (100 000 yr) and is characterized by NNW–SSE horizontal trend of compression and an ENE–WSW horizontal extension. The second stress field has prolate to triaxial extensional ellipsoids, also with ENE–WSW horizontal extension, and continues to be active today. The most recent stresses produce the reactivation of previous joints as faults whose trends are comprised mainly from N120°E to N170°E and have a normal and transtensional regime, with dextral or sinistral components. The palaeostress evolution of this region is similar to that undergone by other basins of the Eastern Betic Cordilleras, although the Pliocene–Pleistocene transcurrent deformations in the Campo de Dalías only develop joints and not strike-slip faults.

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Le Campo de Dalías, situé entre les Cordillères bétiques centrales et orientales, montre une évolution déterminée par la superposition de deux systèmes de contraintes principales depuis le Pliocène. Le premier se traduit, jusqu'au Pléistocène (100 000 ans), par des systèmes de diaclases hybrides et en extension, qui déterminent des directions de compression horizontale NNW–SSE et d'extension ENE–WSW. Le deuxième système correspond à des ellipsoïdes axialement allongés et triaxiaux, ainsi qu'à des directions d'extension ENE–WSW, et est encore actif actuellement. Les contraintes les plus récentes provoquent la réactivation des diaclases antérieures, en failles, dont les directions sont principalement comprises entre N120°E et N170°E, avec des rejets normaux ou transtensionnels dextres ou senestres. Bien que les déformations décrochantes d'âge Plio-Pléistocène soient plus faibles et ne se traduisent que par des diaclases, l'évolution des paléocontraintes de cette région est semblable à celle d'autres bassins des Cordillères bétiques orientales.

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Corresponding author.

E-mail address: jgalindo@ugr.es (J. Galindo-Zaldívar).

Keywords: Faulted joints; Palaeostress; Plio-Quaternary; Campo de Dalías; Betic Cordillera; Spain

Mots-clés : Diaclases faillées ; Paléocontraintes ; Plio-Quaternaire ; Campo de Dalías ; Cordillères bétiques ; Espagne

Version française abrégée

1. Introduction

Les Cordillères bétiques et rifaines se sont développées à la terminaison occidentale de la Méditerranée, entre les plaques Afrique et Eurasie, et présentent des déformations et des sismicités récentes généralisées. Dans les Cordillères bétiques, les Zones internes sont constituées par la superposition de trois complexes tectoniques, qui sont de bas en haut : Névalo-Filabrides, Alpujarrides et Malaguides (Fig. 1). Les Zones internes forment aussi le soubassement de la mer d'Alboran, bassin rempli par des sédiments discordants du Néogène et du Quaternaire.

Les contraintes déterminées dans les bassins des Cordillères bétiques orientales témoignent d'un régime tectonique décrochant, du début du Messinien jusqu'au Pliocène, avec un axe de contrainte maximale (σ_1) subhorizontal, d'orientation NNW–SSE [6,9,12]. De plus, ces bassins ont subi au Pliocène supérieur–Quaternaire des paléocontraintes extensionnelles à direction d'extension variable, liées au développement de failles normales.

Dans le Campo de Dalías (Fig. 1), à la bordure septentrionale de la mer d'Alboran, des sédiments néogènes et quaternaires se sont déposés au-dessus du complexe Alpujarride. La série néogène commence par des calcarénites du Tortonien, suivies de marnes et de calcarénites du Pliocène. Des sédiments détritiques marins du Pléistocène, situés sur des terrasses marines [5], recouvertes par des conglomérats continentaux déposés en éventails alluviaux et par des silts rouges du Pléistocène supérieur–Holocène [1], reposent sur le Néogène.

Les recherches réalisées dans la région [1,3,10,11] soulignent l'existence de plusieurs jeux récents de fractures. Parmi celles-ci, la zone de faille de Balanegra appartient au groupe des fractures sismiques [13] N120°E à N170°E, l'un des plus actifs [3]. Les mécanismes au foyer indiquent que les failles actives ne se développent que dans un contexte particulier, principalement sous forme de failles normales, qui présentent parfois des rejets à composante dextre ou senestre,

et moins souvent par des failles décrochantes ou inverses. Cette région a subi un soulèvement régional depuis le Pliocène [11].

Cette zone entre Almeria et Malaga présente un grand intérêt, étant donné que les sédiments néogènes et quaternaires de la bordure nord de la mer d'Alboran affleurent ici d'une façon exceptionnelle. De plus, c'est une zone intermédiaire entre les Cordillères Bétiques orientales, caractérisées par une tectonique de décrochement, et les Cordillères Centrales, qui montrent principalement de grandes failles normales.

L'objectif de cette contribution est de déterminer la relation entre le développement des diaclases et des failles, observées principalement dans le Plio-Quaternaire du Campo de Dalías. En outre, cette étude contribuera à déterminer l'évolution récente des contraintes régionales qui ont produit ces structures et qui sont responsables de la grande variabilité des régimes observés sur les failles.

2. Diaclases et failles

Les études de terrain montrent que les roches néogènes sont déformées par des diaclases subverticales, regroupées en plusieurs systèmes (Fig. 2). Bien qu'un seul système soit bien développé dans les dépôts du Pléistocène supérieur–Holocène, les roches les plus anciennes ont été déformées à plusieurs reprises avec des directions principalement comprises entre N120°E et N170°E. De plus, les affleurements d'âge Tortonien montrent un ensemble de diaclases de direction N40°E, qui n'a pas été identifié dans les roches plus jeunes.

Les calcarénites tortoniennes du Nord-Est du Campo de Dalías (diagrammes 5 et 6, Fig. 2) sont déformées par deux systèmes principaux de diaclases subverticales, de directions presque orthogonales NW–SE et NE–SW. Dans la région, il est impossible d'établir le rapport précis entre les deux systèmes. Il s'agit probablement de diaclases en extension.

Les diaclases les plus fréquentes, avec des directions entre N120°E et N170°E, sont bien exposées dans les calcarénites pliocènes. Elles affectent même les dépôts marins de terrasses datés à 100 000 ans

par Goy et Zazo [5]. Elles sont regroupées en deux systèmes principaux, qui indiquent leur caractère cisailant ou hybride, ou avec un jeu principal, qui suggère leur nature extensive, bien que la direction des diaclases varie selon les endroits. Dans certains affleurements (diagramme 10, Fig. 2), des diaclases d'orientations intermédiaires peuvent constituer un spectre de diaclases dans le sens de Hancock [8]. Les configurations les plus fréquentes, observées dans les affleurements, sont du type «y» et «K» selon la classification de Hancock [7], avec des angles dans les diaclases hybrides compris entre 20° et 45° (Figs. 2 et 3E). Les diaclases en extension présentent des phases d'ouverture différentes avec un remplissage symétrique de calcite. À la bordure nord du Campo de Dalías, ces diaclases ont subi une activité récente, et certaines d'entre elles se sont remplies de sols. Quelques diaclases présentent une ouverture qui peut atteindre jusqu'à 1 m. Les roches d'âge Pléistocène supérieur–Holocène sont déformées par un seul jeu de diaclases en extension, dont la direction varie de N120°E à N170°E (diagramme 3 et 4 de la Fig. 2). Cependant, dans le Campo de Dalías central et méridional, ces diaclases sont scellées par les dépôts du Pléistocène supérieur–Holocène (Fig. 3).

Les failles les mieux représentées dans le Campo de Dalías (Fig. 1) affectent même les sédiments plio-quadernaires et ont des directions comprises entre N120°E et N170°E : failles normales N140°E (faille de Balanegra) à fort pendage; failles transtensives dextres entre N140°E et N120°E (faille de la Loma del Viento); failles senestres N140°E à N170°E. On a également observé une faille inverse syn-sédimentaire pliocène, de direction NE–SW et à pendage vers le sud-est. La plupart des failles normales développent des bassins asymétriques remplis par des coins sédimentaires en éventail, soulignant ainsi l'activité progressive de ces failles pendant le Pléistocène supérieur–Holocène. L'activité tectonique récente modifie le réseau de drainage dans les éventails alluviaux quadernaires et détermine l'orientation actuelle de la ligne côtière, comme le montrent les failles de Balanegra et de Punta Entinas (Fig. 1).

La carrière de Matagorda (Figs. 1 et 3) permet d'observer la relation entre les diaclases et les failles. Cette carrière est située dans un petit graben à soubassement de calcarénites pliocènes, rempli par des silts rouges continentaux du Pléistocène supérieur–Holocène. Le graben a été produit par des failles d'orientation NW–

SE. Ces failles ont les mêmes directions, pendages et configurations tectoniques que les diaclases (Fig. 3). À l'échelle de l'affleurement, on peut observer le parallélisme entre les failles et les diaclases, qui présentent des pendages supérieurs à 60°. Les failles sont de régimes variables. La plupart des stries sur les surfaces des failles sont obliques et présentent un régime trans-tensif, avec des rejets normaux-senestres ou normaux-dextres, selon l'orientation de l'accident. Les failles se sont développées après les diaclases. Tandis que les diaclases affectant les calcarénites pliocènes sont scellées par les silts rouges du Pléistocène supérieur–Holocène, les failles ont une activité progressive jusqu'à nos jours, comme le démontre la géométrie en éventail des silts rouges qui remplissent le graben (Fig. 3).

Avec la méthode du réseau de recherche en grille [4], on a pu établir les paléocontraintes à partir des failles striées. Cette méthode peut déterminer la compatibilité des failles avec un ellipsoïde de contrainte. À partir des 16 stries mesurées, on a déterminé un ellipsoïde de contrainte axialement allongé (rapport axial de $0,26 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$) et un axe de contrainte minimale horizontale (σ_3) avec une direction WSW–ENE, ce qui implique une extension dans cette direction. Auprès de la faille de Balanegra, on a déterminé un ellipsoïde de contraintes similaire (Fig. 2).

3. Discussion

Théoriquement, les failles néoformées près de la surface doivent avoir un rejet à pendage raide ou bien être décrochantes, étant donné que la surface de la Terre n'a pas de contrainte de cisaillement. Bott [2] a étudié les mécanismes qui pourraient causer des rejets obliques à faible profondeur dans la croûte. De tels rejets doivent essentiellement être une conséquence de réactivations des fractures pré-existantes, sous l'influence de nouvelles contraintes.

On peut observer ce type de structures dans la zone étudiée parmi l'ensemble des failles complexes avec des régimes variables. Toutes ces failles peuvent être expliquées par un ellipsoïde de contraintes qui s'applique aux différentes fractures antérieures, avec leurs diverses orientations. De plus, les diaclases qui affectent les roches jusqu'au Pléistocène moyen ont plusieurs caractéristiques géométriques, comme le pen-

dage, la direction et une architecture semblable à celles des failles du Pléistocène supérieur–Holocène. Donc, ces failles peuvent être considérées comme étant des diaclases faillées dans le sens de Wilkins [14].

À la carrière de Matagorda (Fig. 3), les jeux de diaclases hybrides ou en extension ainsi que l'orientation des affleurements du Tortonien–Pléistocène moyen (Fig. 2) indiquent une compression horizontale NNW–SSE et une extension horizontale WSW–ENE. Dans la région, ces contraintes en activité jusqu'au Pléistocène moyen produisent des diaclases hybrides et en extension, des failles inverses synsédimentaires et des plis orientés ENE–WSW (Fig. 1).

L'analyse des paléocontraintes réalisée à la carrière de Matagorda, avec la méthode du réseau de recherche en grille [4] des stries mesurées sur les failles du Pléistocène supérieur–Holocène, indique une seule phase de contraintes. Elle se caractérise par un ellipsoïde axialement allongé, avec un axe σ_3 horizontal WSW–ENE et un axe σ_1 subvertical. Les angles qui font les stries observées et les cisaillements calculés sont reportés sur l'histogramme de la Fig. 3A, avec un angle moyen de 18,4°. Les contraintes récentes ont produit des rejets obliques dans les accidents plus anciens. Les failles N140°E à N170°E ont un rejet qui va de normal à normal-senestre, tandis que les failles N140°E à N120°E ont, de préférence, un rejet qui va de normal à normal-dextre. La grande variété des mécanismes de foyer [13] observée dans la région peut également être associée à ce processus.

Le changement entre les deux contraintes implique un échange de la direction de compression. La compression était NNW–SSE horizontale pendant le développement des diaclases et il devient subvertical quand les failles commencent à être actives. L'axe principal minimal continue d'avoir la même direction ENE–WSW horizontale. Le changement du régime de contraintes a dû se produire il y a environ 100 000 ans, étant donné que les dépôts marins de terrasses de cet âge [5] sont les dépôts les plus jeunes affectés par les systèmes de diaclases hybrides.

L'évolution des contraintes dans le Campo de Dalias est semblable à celle qui est connue dans d'autres bassins néogènes situés plus à l'est [6,9,12]. Dans notre région, les failles décrochantes ne se développent pas ; cependant, il y a des diaclases hybrides et en extension. De plus, les contraintes récentes présentent une direction d'extension ENE–WSW bien

nette, contrairement aux directions variables observées dans les autres bassins. Cette direction d'extension détermine l'activité des failles qui contrôlent localement l'orientation de la ligne côtière, bien qu'elle soit oblique à la direction est–ouest, qui prédomine entre Malaga et Almeria.

Les deux systèmes de diaclases orthogonaux identifiés dans des roches du Tortonien peuvent être interprétés comme des diaclases de tension développées par une permutation des orientations d'extension horizontales, avec une direction NW–SE et NE–SW avant le Pliocène. Cependant, le système NW–SE a pu se réactiver pendant le Pliocène.

Les grandes variations de l'orientation du système de diaclases observées dans les roches du Pléistocène supérieur–Holocène peuvent être résulter de l'influence de l'orientation des fractures antérieures dans des roches plus anciennes. Loin des failles récentes, le jeu des diaclases a une orientation NNW–SSE, ce qui indique une extension subhorizontale ENE–WSW (diagramme 3 de la Fig. 2), tandis que, près des failles développées par réactivation des diaclases pliocènes (diagramme 4 de la Fig. 2), l'orientation du système de diaclases devient NW–SE.

4. Conclusions

Le Campo de Dalias montre l'interférence de deux champs de contraintes principales. Les premières contraintes ont été actives pendant le Pliocène et ont continué de l'être durant le Pléistocène jusqu'à 100 000 ans. Elles sont caractérisées par des ellipsoïdes de paléocontraintes, avec des axes σ_1 NNW–SSE et σ_3 NNE–SSW horizontaux. Ces contraintes ont développé des systèmes de diaclases hybrides et de tension, des failles inverses et des plis. Depuis 100 000 ans, un changement dans l'ellipsoïde de contraintes produit la permutation de l'orientation de compression et de l'axe intermédiaire, alors qu'il conserve la direction d'extension ENE–WSW subhorizontale. Le nouvel ellipsoïde de contraintes est triaxial à axialement allongé avec un rapport axial de 0,26. Les contraintes récentes produisent la réactivation en failles des diaclases précédentes, qui peuvent donc être considérées comme des diaclases faillées. La grande variété du régime des failles, normale, transtensive, à composante dextre ou senestre, et même inverse, est la conséquence d'une

seule contrainte appliquée sur des fractures précédentes, avec leur grande variété d'orientation.

La succession des régimes transcurrents et en extension dans cette zone peut être une conséquence de sa position entre la Cordillère bétique centrale, où prédominent les failles normales, et la Cordillère bétique orientale, principalement affectée par des failles décrochantes. Bien que les déformations décrochantes pliocènes ne développent que des diaclases et non des failles, l'évolution des paléocontraintes de cette région est semblable à celle d'autres bassins des Cordillères bétiques centro-orientales.

1. Introduction

The Betic and Rif Cordilleras have developed in the western end of the Mediterranean, between the African and Eurasian plates, and show distributed recent deformations and seismicity. In the Betic Cordilleras, the Internal Zones are formed by the superposition of three tectonic complexes that are, in ascending order: the Nevado-Filábride, Alpujárride and Maláguide complexes (Fig. 1). The Internal Zones continue below the Alboran Sea and constitute the basement of this basin, filled by unconformable Neogene and Quaternary sediments.

Basins of the Eastern Betic Cordilleras reveal stress tensors indicating a strike-slip regime from the Early Messinian to Early Pliocene, with a NNW–SSE subhorizontal maximum stress axis (σ_1) [6,9,12]. In addition, these basins have undergone extensional palaeostresses related to the development of normal faults in the Late Pliocene–Quaternary, although the trend of extension is poorly constrained.

The Campo de Dalías (Fig. 1) features outcrops of Neogene and Quaternary sediments of the northern boundary of the Alboran Sea deposited on the Alpujárride Complex. The Neogene sedimentary sequence begins with Tortonian calcarenites and is followed by Pliocene marls and calcarenites. The top of the sequence consists of Pleistocene marine detritic sediments that are located on marine terraces [5], overlain by continental conglomerates deposited in alluvial fans and red silts of Late Pleistocene–Holocene [1].

Research carried out in the region [1,3,10,11] indicates the presence of several fracture sets with recent activity. Among them, the Balanegra fault zone

belongs to the N120°E to N170°E fracture set, and is one of the most active structures [3] with related seismicity [13]. The focal mechanisms of these earthquakes indicate that the active faults develop in a complex setting, determined mainly by normal faults that sometimes show dextral or sinistral components, and scarcer strike-slip and even reversal faults. This area has undergone regional uplift since Pliocene [11].

The region is of great interest because it is one of the few zones between Almería and Malaga where Neogene and Quaternary sediments of the northern boundary of the Alboran Sea crop out. Moreover, it is an intermediate area between the Eastern Betic Cordilleras, characterised by strike-slip tectonics, and the Central Cordilleras, basically characterised by the presence of normal faults.

The aim of this contribution is to clarify the relationship between the development of joints and faults observed mainly since the Pliocene in the Campo de Dalías. In addition, our study enables us to determine the recent evolution of the regional stresses that generated these structures, and are responsible for the great variability of the observed fault regimes.

2. Joints and faults

Field studies show that Neogene rocks are deformed by subvertical joints grouped in several sets (Fig. 2). While only one set is well developed in the Late Pleistocene–Holocene deposits, the older rocks are deformed by several joint sets with trends comprised mainly between N120°E and N170°E. In addition, the Tortonian outcrops are deformed by a joint set with a N40°E trend that has not been identified in the younger rocks.

Thus, the outcrops of Tortonian calcarenites on the northeastern side of the Campo de Dalías (diagrams 5 and 6 in Fig. 2) are deformed by two main sets of subvertical joints that have nearly orthogonal NW–SE and NE–SW trends. It is not possible to establish the precise relationship between the two joint sets in the field, but they probably represent tensional joints.

The most frequent N120°E to N170°E joints are well exposed in Pliocene calcarenites and affect up to marine terrace deposits dated by Goy and Zazo [5] at 100 000 yr. They are grouped, depending on the site, in two main sets with a shear or hybrid character, or a

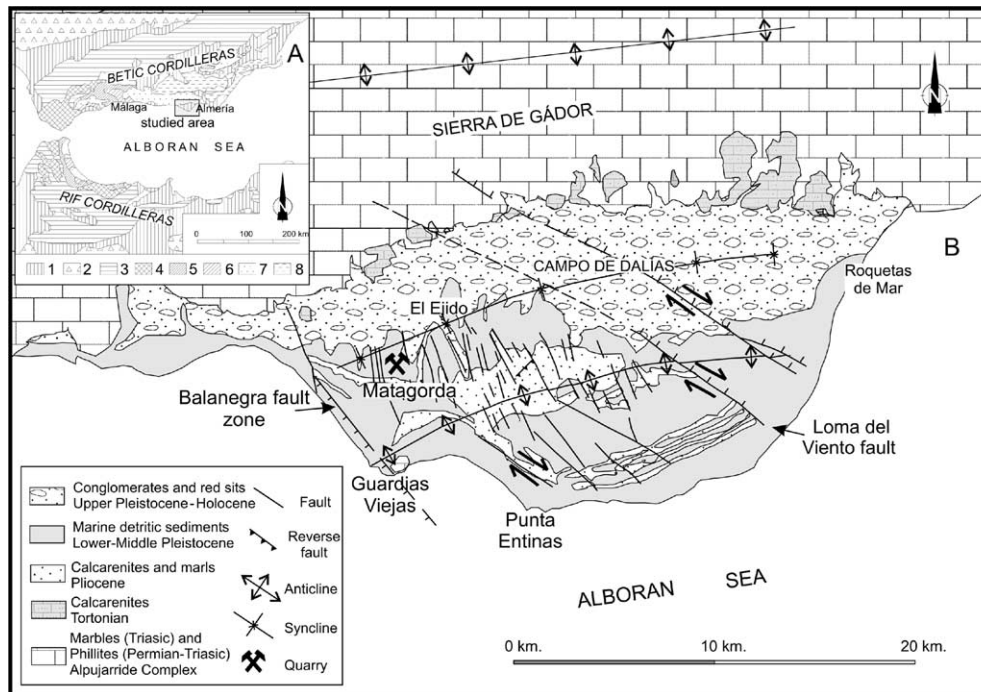


Fig. 1. Geological sketch of the Betic–Rif Cordilleras (A) and of Campo de Dalías (B). 1, Neogene and Quaternary sedimentary rocks. 2, Iberian and Moroccan Massifs. 3, External Zones of Betic and Rif Cordilleras. 4, Flysch units. Internal Zones: 5, Alosaina, Predorsalian and Dorsalian complexes; 6, Malaguide and Ghomaride Complexes; 7, Alpujarride and Sebtime Complexes; 8, Nevado-Filábride Complex.

Fig. 1. Schéma géologique des Cordillères bétiques et rifaines (A) et du Campo de Dalías (B). 1, Roches sédimentaires néogènes et quaternaires. 2, Massifs ibérique et marocain. 3, Zones externes. 4, Flyschs. Zones Internes : 5, complexes d'Alosaina, prédorsaliens et de la Dorsale ; 6, complexes Malaguide et Ghomaride ; 7, complexes Sebtime et Alpujarride ; 8, complexe Névado-Filabride.

main set suggesting a tensional nature. In some outcrops (diagram 10 in Fig. 2), there are joints with intermediate orientations that may constitute a joint spectrum in the sense of Hancock [8]. The joint patterns observed in outcrops are of 'y' and 'K' types, also according to Hancock's [7] classification, with angles in hybrid joints comprised between 20° and 45° (Figs. 2 and 3E). Tensional joints show different opening phases, with symmetric calcite fill. On the northern side of the Campo de Dalías, they have undergone recent activity and some have been filled with soils. A number of joints have openings that may reach up to 1 m. The measurement stations in Late Pleistocene–Holocene rocks in this region show a single tensional joint set, with a trend that varies between $N120^\circ E$ and $N170^\circ E$ (diagrams 3 and 4 in Fig. 2). However, in the central and southern Campo de Dalías, these joints are sealed by the Late Pleistocene–Holocene deposits (Fig. 3).

The best represented faults of the Campo de Dalías (Fig. 1) affect up to Plio-Quaternary sediments and have trends comprised between $N120^\circ E$ and $N170^\circ E$. The area includes $N140^\circ E$ normal faults (Balanegra Fault) with very high angle dipping surfaces, as well as transtensional faults with a dextral slip component and trends roughly between $N140^\circ E$ and $N120^\circ E$ (Loma del Viento Fault) and with a sinistral slip component and trends from $N140^\circ E$ to $N170^\circ E$. Also identified locally is a synsedimentary reverse fault with NE–SW trend and dip towards the southeast in Pliocene sediments. Most of the faults develop a half-graben structure that is filled by a sedimentary wedge showing the progressive fault activity during the Late Pleistocene–Holocene. Recent tectonic activity can be seen in some sectors, modifying the drainage network in Quaternary alluvial fans and determining the present-day orientation of the coastline in the Balanegra and Punta Entinas fault zones (Fig. 1).

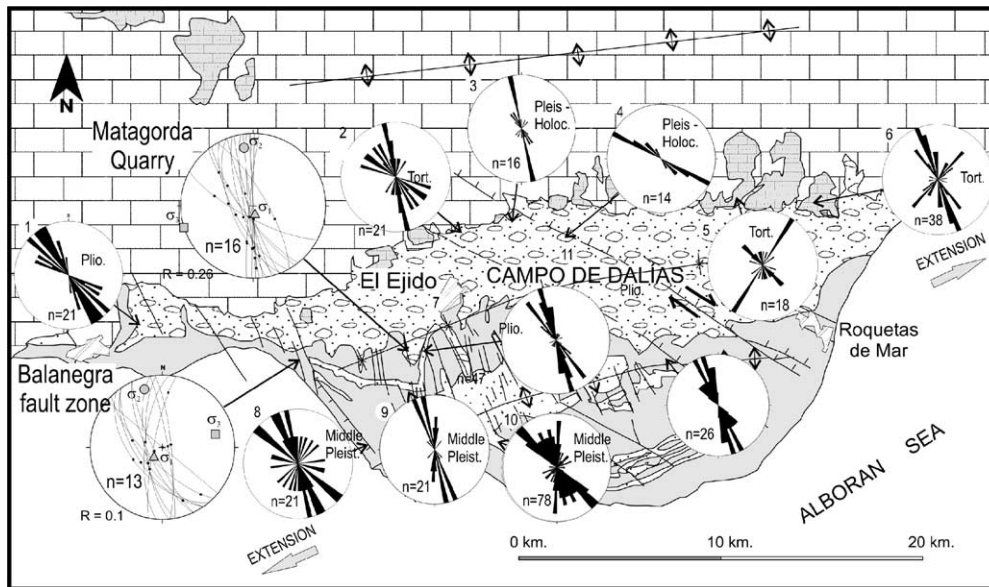


Fig. 2. Rose diagrams of joints from several measurement stations of Campo de Dalías. The upper left number of rose diagrams indicates the station number. The lower number of rose diagrams indicates the data number of each station. The diagrams show an abbreviation indicating the age of sediments. Measured fault stations are also indicated, including stereographic projection, lower hemisphere of the fault data.

Fig. 2. Diagramme en rose des diaclases de plusieurs stations de mesure du Campo de Dalías. Le chiffre gauche supérieur des diagrammes en rose indique le nombre de stations. Le chiffre inférieur des diagrammes indique le nombre de données de chaque station. Les diagrammes montrent en abrégé l'âge des sédiments. On indique la localisation des affleurements des failles analysés. Projection stéréographique, hémisphère inférieur.

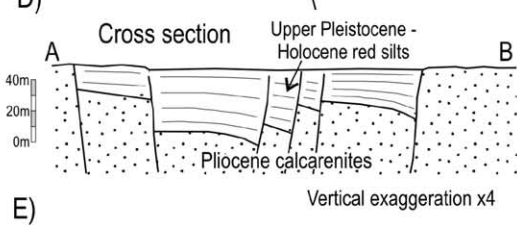
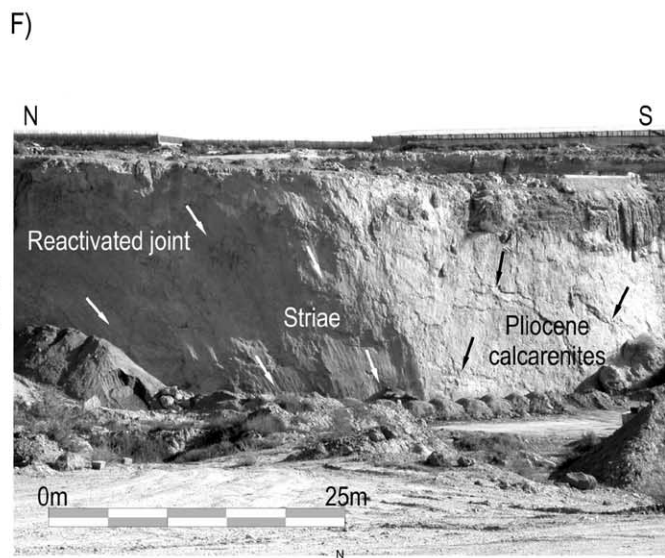
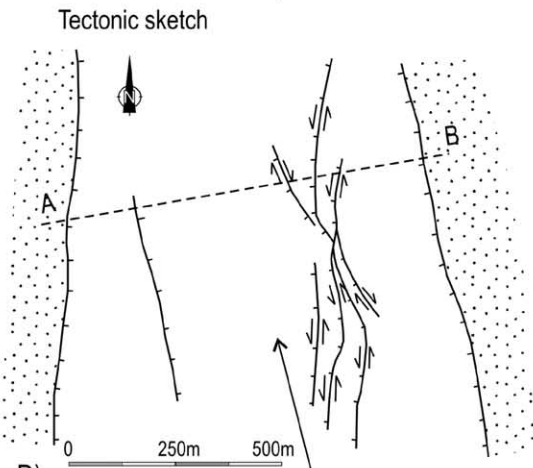
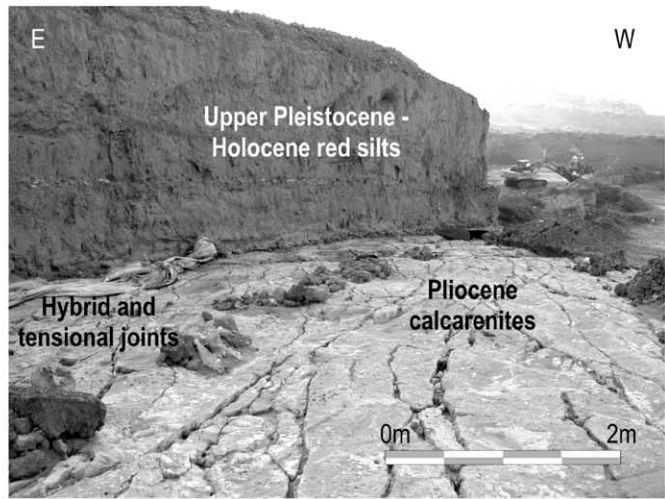
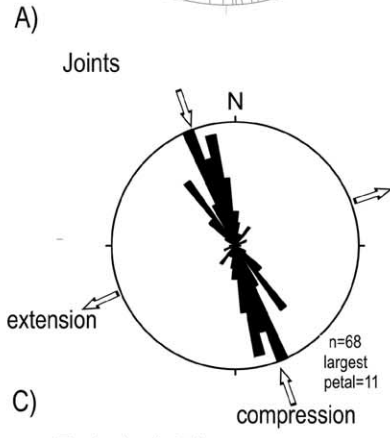
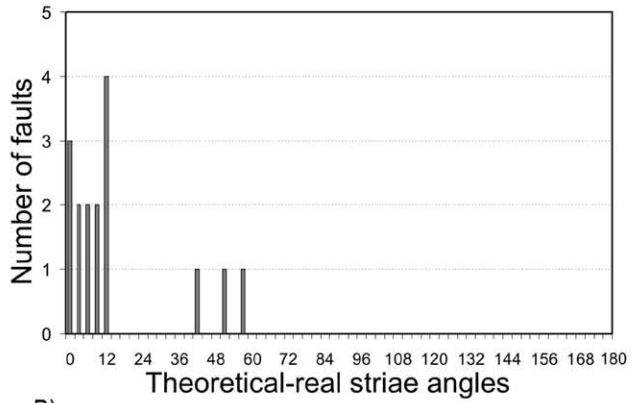
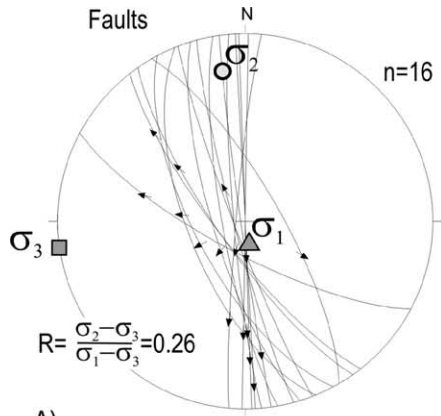
The Matagorda quarry (Figs. 1 and 3) allows us to observe the relationship between joints and faults. This quarry is located on a small graben whose basement is formed by Pliocene calcarenites and is filled by Late Pleistocene–Holocene continental red silts. The graben was generated by NW–SE oriented faults, which have the same trends, dip and tectonic pattern as the joints (Fig. 3). At the outcrop scale the parallelism is evident between faults and joints that show the same high dipping surfaces, over 60° . The faults have variable regimes. Most of the measured striae on fault planes are oblique and show a complex transtensional regime with normal-sinistral or normal-dextral slips, depending on the fault trend. However, the timing of the development of faults and joints is different. While the joints affecting Pliocene calcarenites are sealed by Late Pleistocene–Holocene red silts, the faults have a progressive activity up to Present, as demonstrated by the wedge shape of the red silts filling the graben (Fig. 3).

Palaeostresses were determined from the fault plane striae by means of the grid-search network [4].

This method can determine fault compatibility with a stress ellipsoid. Taking into account 16 measured striae, we determined a single stress ellipsoid characterized by a triaxial to prolate shape (axial ratio of $0.26 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$), and a horizontal minimum stress axis (σ_3) with WSW–ENE trend, implying extension in this direction. Similar stress ellipsoid is determined in a site near Balanegra Fault Zone (Fig. 2).

3. Discussion

Theoretically, most of the neoformed faults near the surface have either a dip-slip or a strike-slip motion because the Earth's surface should be shear stress free. Bott [2] studied various mechanisms that could cause oblique slip faulting at shallow depths in the crust. Oblique displacements on the surface of fault planes must be fundamentally a consequence of renewed motion along pre-existing fault planes under the influence of newly oriented stresses.



This process can be observed in the studied area, where a complex set of faults with variable regimes crops out. All these faults may be explained by a single stress ellipsoid that is applied to the differently oriented previous fractures. In addition, the joints that affect up to Middle Pleistocene rocks have several geometrical features such as dip, trend and pattern similar to the Late Pleistocene–Holocene faults. These faults, then, may be considered as faulted joints in the sense of Wilkins [14].

The hybrid and tensional joint sets in the Matagorda quarry (Fig. 3) and the Tortonian–Middle Pleistocene outcrops (Fig. 2) indicate an average NNW–SSE horizontal compression and an orthogonal WSW–ENE horizontal extension. These stresses – active in the region up to Middle Pleistocene – generate hybrid and tensional joints, synsedimentary reverse faults and ENE–WSW oriented folds (Fig. 1).

The palaeostress analysis with the grid search network method [4] from the measured striae of Late Pleistocene–Holocene faults of the Matagorda quarry shows a single stress phase characterized by a prolate stress ellipsoid with a WSW–ENE horizontal σ_3 axis and a subvertical σ_1 axis. The theoretical and real striae angles in faults are shown in the histogram of Fig. 3A, with an average value of 18.4° . The most recent stresses probably generated oblique displacements in the previous joint sets. The faults with N140°E–N170°E trends display normal slip to normal-sinistral slips, whereas the faults with N140°E–N120°E directions display normal to normal-dextral slips. The large variety in focal mechanisms [13] observed in the region may also be associated with this process.

The change from one stress field to another implies an exchange of the trend of compression. The compression was NNW–SSE horizontal when the joints were generated, and happened to be subvertical when the faults began to be active. The minimum principal axis continues to have the same horizontal ENE–WSW trend. The change in the stress regime should have taken place after approximately 100 000 yrs because marine terrace deposits of this age [5] are the youngest deposits affected by the hybrid joint sets.

The evolution of stresses in the Campo de Dalías seems to be similar to those determined in other Neogene basins located east of the study area [6,9,12]. However, the transcurrent stresses do not develop strike-slip faults in our region, and produce only hybrid and tensional joints. The recent extensional stresses show a well-determined trend of ENE–WSW extension, contrasting with the variable trends of extension observed in the other basins. This trend of extension, which determines the activity of faults and locally the orientation of the coastline, however, is oblique to the main trend of the coast from Malaga to Almeria.

The two joint sets that are identified in Tortonian rocks may be interpreted as orthogonal tensional joints developed by a switch of the horizontal trend of extension before Pliocene in NW–SE and NE–SW trends. Notwithstanding, the NW–SE-oriented set may have been reactivated during the Pliocene.

Finally, the great variations in the orientation of the single joint set observed in Pleistocene–Holocene rocks may be a consequence of the influence of previous fractures. While far from the recent faults, the joint set indicates a ENE–WSW subhorizontal trend of extension (diagram 3 in Fig. 2), the orientation of the

Fig. 3. Illustrations of features of Matagorda quarry. (A) Stereographic plot, lower hemispheres of Late Pleistocene–Holocene faults. Arrows represent striae with sense of hangingwall motion. Circles represent the main stress axes. (B) Histogram showing the distribution of the angles between real (observed) and theoretical (calculated shear) striae. (C) Rose diagrams of Pliocene joints with indications of maximum and minimum stress axes. (D) Tectonic sketch of the quarry showing the regime of the faults. (E) Cross-section A–B. (F) Photograph showing the presence of a hybrid joint set sealed by Late Pleistocene–Holocene red silts. (G) Faulted joint surface with indication of striae on the plane with sinistral component (left) and dextral component (right).

Fig. 3. Carrière de Matagorda. (A) Projection stéréographique, hémisphères inférieures des failles d'âge Pléistocène supérieur–Holocène. Les flèches représentent des stries, avec le sens du mouvement du bloc de toit. Les cercles représentent les axes principaux des contraintes. (B) Histogramme représentant les angles entre les stries observées et les cisaillements calculés. (C) Diagrammes en rose des diaclases pliocènes, avec l'indication des directions de compression et d'extension. (D) Schéma tectonique de la carrière, représentant le régime des failles. (E) Coupe géologique A–B. (F) Photographie montrant la présence du jeu de diaclases hybrides recouvert par des silts rouges d'âge Pléistocène supérieur–Holocène. (G) Surfaces de diaclases faillées avec l'indication des stries sur le plan de faille à composante senestre (à gauche) et dextre (à droite).

joint set become parallel to the Pliocene joints reactivated as faults during the Late Pleistocene–Holocene (diagram 4 in Fig. 2). This fact suggests that the orientation of fractures in recent rocks is determined by the geometry of the fractures in their basement as well as the features of the recent stress field.

4. Conclusions

The Campo de Dalías evidences the successive overprinting of two main stress fields. The first one was active during the Pliocene and continued through the Pleistocene up to 100 000 yr ago, and is characterized by palaeostress ellipsoids with a NNW–SSE horizontal σ_1 axis and a NNE–SSW horizontal σ_3 . These stresses led to the widespread development of hybrid and tensional joint sets, reverse faults and open folds. After 100 000 yr, approximately, a change in stress ellipsoid took place, with the switching of trend of compression and intermediate axis, while the extension trend remained ENE–WSW and subhorizontal. The new stress ellipsoid is prolate to triaxial, with a 0.26 axial ratio. This new stress produced the reactivation of the previous joints as faults that may be considered as faulted joints. The great variety of the fault regime, which includes normal and transtensional faults with dextral and sinistral components, is therefore produced by a single stress applied upon previous fractures with a wide variety of orientations.

The succession of transcurrent and extensional regimes in this area may be a consequence of its location between the Central Betic Cordillera, dominated by normal faulting, and the Eastern Betic Cordillera, mainly deformed by transcurrent faults. The palaeostress evolution of this region is similar to that of other basins recognised in the central–eastern Betic Cordilleras, although the Pliocene transcurrent deformations only develop joints in the strict sense and not strike-slip faults.

Acknowledgements

This study was supported by the IGME (Instituto Geológico y Minero de España) in the framework

of a PhD grant to the first author, and Project CI-CYT BTE2000–1490-C02–01. We thank J. Angelier for helpful reviewing of the manuscript.

References

- [1] J. Baena, K. Ewert, Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1.058 (Roquetas de Mar) del Mapa geológico nacional, IGME, 1:50 000, 1983.
- [2] M.H.P. Bott, The mechanics of oblique faulting, *Geol. Mag.* 2 (1959) 109–117.
- [3] J. Fourniguet, Quaternaire marin et néotectonique sur la côte andalouse méridionale (Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 282 (1976) 1849–1852.
- [4] J. Galindo-Zaldívar, F. González-Lodeiro, Faulting phase differentiation by means of computer search on grid pattern, *Ann. Tectonicæ* 2 (1988) 90–97.
- [5] J.L. Goy, C. Zazo, Synthesis of the Quaternary in the Almería littoral neotectonic activity and its morphologic features, western Betics, Spain, *Tectonophysics* 130 (1986) 259–270.
- [6] R. Jonk, C. Biermann, Deformation in Neogene sediments of the Sorbas and Vera Basins (SE Spain): constraints on simple-shear deformation and rigid body rotation along major strike-slip faults, *J. Struct. Geol.* 24 (2002) 963–977.
- [7] P.L. Hancock, Brittle microtectonics: principles and practice, *J. Struct. Geol.* 7 (1985) 437–457.
- [8] P.L. Hancock, Joint spectra, in: I. Nichol, R.W. Nesbitt (Eds.), *Geology in the Real World*, The Kingsley Dunham volume, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1986, pp. 155–164.
- [9] P. Huijbregtse, H.V. Alebeek, M. Zaai, C. Biermann, Palaeostress analysis of the northern Nijar and southern Vera basins: constraints for the Neogene displacement history of major strike-slip faults in the Betic Cordilleras, SE Spain, *Tectonophysics* 300 (1998) 79–101.
- [10] J.J. Martínez-Díaz, Actividad neotectónica en el sureste de Almería y su incidencia en la morfotectónica de la zona (Cordilleras Béticas), *Rev. Soc. Geol. España* 13 (2000) 417–429.
- [11] J. Rodríguez-Fernández, J. Martín-Penela, Neogene evolution of the Campo de Dalías and surrounding offshore areas (Northeastern Alboran Sea), *Geodin. Acta* 6 (1993) 255–270.
- [12] G. Stapel, R. Moeys, C. Biermann, Neogene evolution of the Sorbas basin (SE Spain) determined by palaeostress analysis, *Tectonophysics* 255 (1996) 291–305.
- [13] A.G. Stich, J. Morales, The relative locations of multiplets in the vicinity of the Western Almería (southern Spain) earthquake series of 1993–1994, *Geophys. J. Inter.* 146 (2001) 801–812.
- [14] S.J. Wilkins, M.R. Gross, M. Wacker, Y. Eyal, T. Engelder, Faulted joints: kinematics, displacement-length scaling relations and criteria for their identification, *J. Struct. Geol.* 23 (2001) 315–327.