



## ACTIVIDAD DE PLIEGUES Y FALLAS EN EL CAMPO DE DALÍAS A PARTIR DE REDES GNSS

### *Fold and fault activity in the Campo de Dalías from GNSS networks*

J. Galindo-Zaldívar<sup>1,2</sup>, A.J. Gil<sup>3,4</sup>, V. Tendero<sup>2</sup>, M.J. Borque<sup>3,4</sup>, G. Ercilla<sup>5</sup>, L. González-Castillo<sup>1</sup>, A. Sánchez-Alzola<sup>6</sup>, M.C. Lacy<sup>3,4</sup>, F. Estrada<sup>5</sup>, M. Avilés<sup>3,4</sup>, P. Alfaro<sup>7</sup>, A. Madarieta-Txurruka<sup>1</sup>, F. Chacón<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. jgalindo@ugr.es, vtendero@ugr.es, lgcastillo@ugr.es, amadatxu@ugr.es.

<sup>2</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), 18071 Granada, Spain.

<sup>3</sup> Departamento Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Campus de Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain. ajgil@ujaen.es, mjborque@ujaen.es, mclacy@ujaen.es, maviles@ujaen.es, fchacon@ujaen.es.

<sup>4</sup> Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA), Universidad de Jaén, Campus de Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain.

<sup>5</sup> Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, Continental Margins Group, 08003 Barcelona, Spain. gemma@icm.csic.es, festrada@icm.csic.es

<sup>6</sup> Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Cádiz, 11510, Puerto Real, Spain. alberto.sanchez@gm.uca.es,

<sup>7</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 03080, Alicante, Spain. pedro.alfaro@ua.es

**Resumen:** La red GNSS del Campo de Dalías monitoriza desde 2006 la deformación tectónica activa de la zona con mayor sismicidad del límite entre la Cordillera Bética y el Mar de Alborán. Las velocidades de deformación residuales calculadas con respecto a Eurasia oscilan entre 1,7 y 3,0 mm/año. Los desplazamientos son aproximadamente homogéneos hacia el OSO de las estaciones del norte, mientras que las estaciones del sur evidencian desplazamientos irregulares hacia el O y el NO. Este patrón de deformación indica el acortamiento NNO-SSE que desarrolla pliegues ENE-OSO simultáneo a la extensión ENE-OSO, acomodada por fallas normales y oblicuas. Además, los resultados de la red GNSS indican un salto dextro de la falla de Balanegra, con orientación NO-SE, que había sido considerada anteriormente como una falla normal. Las redes GNSS revelan, por primera vez, la interacción actual de la tectónica de roll-back asociada a la subducción Rif-Gibraltar-Bética en la parte occidental del Arco de Gibraltar y la tectónica de indentación que afecta a las zonas oriental y meridional del Mar de Alborán. Además, proporciona nuevos datos para los estudios de peligrosidad sísmica en esta región.

**Palabras clave:** Arco de Gibraltar, red GNSS, interacción de pliegues y fallas activas, roll-back, tectónica de indentación.

**Abstract:** *The Campo de Dalías GNSS network monitors since 2006 the active tectonic deformation of the most seismic area on the boundary of the Alboran Sea and the Betic Cordillera. The residual deformation rates determined with respect to Eurasia range from 1.7 to 3.0 mm/yr. The displacements are roughly homogenous towards WSW of the northern sites while the southern sites evidence irregular displacements towards the W and NW. This deformation pattern supports simultaneous NNW-SSE shortening that develops ENE-WSW folds and ENE-WSW extension, accommodated by normal and oblique faults. Moreover, the GNSS results point to dextral kinematics of the main NW-SE Balanegra Fault, that was previously considered as a normal fault. These GNSS results thus reveal, for the first time, present-day interaction of the roll-back tectonics of the Rif-Gibraltar-Betics slab in the western part of the Gibraltar Arc with the indentation tectonics affecting the eastern and southern areas, providing new insights for seismic hazard studies in this region.*

**Key words:** *Gibraltar Arc, GNSS network, active fold and fault interaction, roll-back, indentation tectonics.*

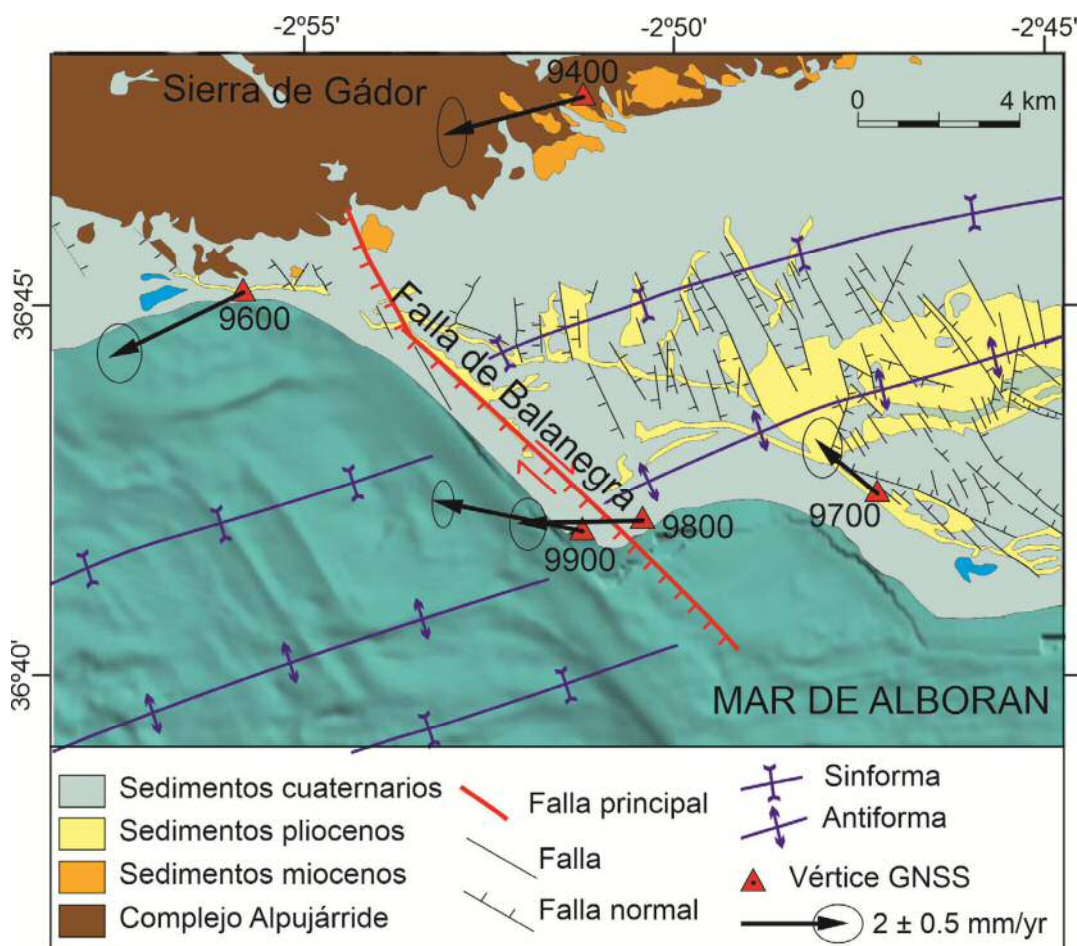
### Introducción

El Arco de Gibraltar es un cinturón tectónico arqueado alpino desarrollado desde el Cenozoico en el límite de placas Eurasia-Nubia (África) (Platt y Vissers, 1989) que actualmente experimenta una tasa de convergencia regional NO-SE de 4,5 a 5 mm/año (Sparacino *et al.*, 2020). En la región con mayor sismicidad del límite entre la Cordillera Bética y el Mar de Alborán, en el Campo de Dalías occidental, se instaló en 2006 una red GNSS no permanente (Fig. 1) (Marín-Lechado *et al.*, 2010; Galindo-Zaldívar *et al.*, 2022). La red tenía como objetivo inicial cuantificar la actividad de la falla normal NO-SE de Balanegra, una de las fallas más activas de la zona, relacionada con la serie sísmica de 1993-94. La actividad de la falla de Balanegra determinó la línea de costa recta que separa el bloque levantado al NE del Campo de Dalías y el bloque hundido localizado al SO y situado por debajo del nivel del mar. Las tasas de deformación vertical obtenidas a partir de líneas de nivelación de alta precisión indican un desplazamiento discontinuo de la zona de falla (Galindo-Zaldívar *et al.*,

2013). El objetivo de este trabajo es presentar los resultados cuantitativos de la red GNSS del oeste de Campo de Dalías (Fig. 1) para discutir la interacción local de pliegues y fallas.

### Metodología

La red GNSS del Campo de Dalías occidental incluye cinco vértices (9400, 9600, 9700, 9800 y 9900, Fig. 1). Cuenta con dispositivos de montaje autocentrantes anclados a las rocas; hasta 2010 el equipo de medida estaba compuesto por antenas LEIAX1202 y receptores Leica Geosystem GX1230. Posteriormente se utilizan antenas LEIAR10 y receptores LEICA Geosystem AR10. Los registros incluyen al menos 96 h para cada observación. El procesado de los datos se realizó con el software GIPSY-OASIS. El campo de velocidad residual se calcula respecto a Eurasia con el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi *et al.*, 2017).



**Fig. 1.-** Esquema geológico del Campo de Dalías occidental que incluye las velocidades residuales GNSS respecto a Eurasia estable. Elipses de error con un 95% de confianza.

**Fig. 1.-** Geological sketch of the western Campo de Dalias including residual GNSS velocities respect to stable Eurasia. Error ellipses of 95% confidence.

Vértice	Velocidad (mm/año)		Error (mm/año)		Velocidad residual (mm/año)	
	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte
9400	17,5	15,6	±0,3	±0,7	-2,7	-0,9
9600	17,6	15,0	±0,4	±0,6	-2,5	-1,6
9700	19,0	17,7	±0,4	±0,6	-1,2	1,2
9800	17,8	16,4	±0,4	±0,5	-2,4	-0,1
9900	17,3	17,2	±0,3	±0,5	-2,9	0,7

**Tabla 1.** Velocidad absoluta en el marco de referencia IGS14 y velocidad residual con respecto a Eurasia estable basada en el ITRF2014. Error con el 95% de confianza.

**Table 1.-** Absolute velocity in IGS14 reference frame and residual velocity field with respect to stable Eurasia based on the ITRF2014. Error of 95% confidence.

## Resultados

Todos los vértices tienen una componente de desplazamiento hacia el oeste con respecto a la Eurasia estable (Fig. 1, Tabla 1) (Galindo-Zaldívar *et al.*, 2022). El comportamiento de los dos vértices del norte (9400 y 9600, Fig. 1) es aproximadamente similar, lo que sugiere que la falla de Balanegra no se propaga hacia el norte. Los movimientos relativos hacia el NNO de los vértices 9700 y 9900 respecto al vértice 9400 localizado al N, indican que el acortamiento de los pliegues ENE-OSO sigue siendo activo. El movimiento relativo entre los vértices 9900 y 9800 sugiere que el salto de la falla de Balanegra es dextro y posiblemente por reptación al producirse en un periodo intersísmico, o bien se está acumulando deformación elástica.

## Discusión y conclusiones

La red GNSS del Campo de Dalías muestra que toda la región está afectada por una deformación continua que incluye la convergencia NNO-SSE, acomodada por pliegues ENE-OSO, y la extensión ortogonal ENE-OSO, acomodada por fallas normales. Los resultados de la red GNSS ponen de manifiesto la actividad actual dextra de hasta 1 mm/año de la falla NNO-SSE de Balanegra a partir del movimiento relativo entre los vértices 9800 y 9900, localizados en cada bloque de falla y próximos a la misma. Su comportamiento de reptación en superficie cambia posiblemente en profundidad, donde tiene carácter sísmico.

A escala regional, el área se localiza en el extremo NNE de la zona de cizalla sinistral Bética-

Alborán. El patrón de deformación activo se justifica por la interacción de la tectónica de indentación que afecta al Mar de Alborán oriental y la tectónica de roll-back que es dominante en la zona occidental del Mar de Alborán.

#### Agradecimientos

Junta de Andalucía; FEDER: AGORA P18-RT-3275, PAPEL B-RNM-301-UGR18; Programa Operativo FEDER-Andalucía 2014–2020 1263446; Universidad de Jaén. CEAITEMA. POAIUJA 21/22, Junta de Andalucía. RNM-148, RNM-282, RNM-370; V.T.S. FPU (16/04038).

#### Referencias

- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collillieux, X., 2017. ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209: 1906-1912.
- Galindo-Zaldívar, J., Borque, M.J., Pedrera, A., Marín-Lechado, C., Gil, A.J., López-Garrido, A.C., 2013. Deformation behaviour of the low-rate active Balanegra Fault Zone from high-precision levelling (Betic Cordillera, SE Spain). *Journal of Geodynamics*, 71: 43-51.
- Galindo-Zaldívar, J., Gil, A.J., Tendero-Salmerón, V., Borque, M.J., Ercilla, G., González-Castillo, L., ... Chacón, F., 2022. The Campo de Dalias GNSS Network Unveils the Interaction between Roll-Back and Indentation Tectonics in the Gibraltar Arc. *Sensors*, 22: 2128.
- Marín-Lechado, C., Galindo-Zaldívar, J., Gil, A.J., Borque, M. J., De Lacy, M.C., Pedrera, A., ... Sanz, C., 2010. Levelling profiles and a GPS network to monitor the active folding and faulting deformation in the Campo de Dalias (Betic Cordillera, Southeastern Spain). *Sensors*, 10, 3504-3518.
- Platt, J.P., Vissers, R.L.M., 1989. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc. *Geology*, 17, 540-543.
- Sparacino, F., Palano, M., Peláez, J.A., Fernández, J., 2020. Geodetic deformation versus seismic crustal moment-rates: insights from the Ibero-Maghrebian region. *Remote Sensing*, 12: 952.