Análisis estructural de la Falla de Santa María del Espino (Rama Castellana, Cordillera Ibérica): Transpresión debida a convergencia en dirección NNO-SSE.

Structural analysis of the Santa María del Espino Fault (Castilian Branch, Iberian Chain): Transpression due to NNW-SSE-oriented convergence.

J. Alonso-Henar[1], C. Fernández[1], G. de Vicente[1], A. Muñoz-Martín[1], A. Olaiz[2]

1 Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. c/José Antonio Novais, 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. jahenar@geo.ucm.es; gdv@geo.ucm.es; cafern08@geo.ucm.es; amunoz@geo.ucm.es.
2 Repsol E&P, C/ Mendez Álvaro, 44. 28045 Madrid. antoniojose.olaiz@repsol.com

Resumen: La Falla de Santa María del Espino se localiza en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (CI). Se orienta en dirección NO-SE, buzando hacia el SO. Superpone, en su parte central, el basamento Paleozoico (pizarras y cuarcitas del Ordovícico y pizarras del Silúrico) sobre los materiales sedimentarios del Triásico (areniscas, arcillas y conglomerados del Buntsandstein). Se ha determinado la orientación y cinemática de las estructuras generadas por la falla en ambos bloques, que incluyen pliegues a distintas escalas, *kink bands* y un conjunto de fallas menores. Se han aplicado distintas técnicas de análisis estructural con objeto de determinar tanto la cinemática de la falla principal como la orientación de los ejes principales del esfuerzo. El resultado muestra la actuación de una transpresión lateral derecha triclínica, con una vorticidad cercana a la transición entre el dominio de la cizalla pura y de la cizalla simple, y una convergencia NNO-SSE entre los bloques separados por la falla. La máxima compresión horizontal (σ_1) se sitúa en dirección NO-SE. Estos resultados confirman la naturaleza transpresiva de las estructuras de la Rama Castellana de la CI.

Palabras clave: Falla de Santa María del Espino, Rama Castellana, Cordillera Ibérica, transpresión dextral, convergencia NNO-SSE**.**

Abstract: *The Santa María del Espino Fault is located in the Castilian Branch of the Iberian Chain (IC). It is oriented in a NW-SE direction, dipping towards the SW. It superimposes, in its central part, the Paleozoic basement (slates and quartzites from the Ordovician and Silurian slates) on Triassic sedimentary materials (sandstones, clays and conglomerates from the Buntsandstein). The orientation and kinematics of the structures generated by the fault in both blocks have been determined, which include folds at different scales, kink bands, and a set of minor faults. Different structural analysis techniques have been applied to determine both the kinematics of the main fault and the orientation of the main stress axes. The result shows the activity of a triclinic dextral transpression, with a vorticity close to the transition between the pure shear- and simple shear-dominated fields, and an NNW-SSE convergence between the blocks separated by the fault. The azimuth of the maximum horizontal compression (σ_1) is NW-SE. These results confirm the transpressive nature of the main structures of the Castilian Branch of the IC.*

Key words: *Santa María del Espino Fault, Castilian Branch, Iberian Chain, dextral transpression, NNW-SSE-oriented convergence.*

INTRODUCCIÓN Y SITUACIÓN GEOLÓGICA

La Cadena Ibérica (CI) es el resultado, durante el Cenozoico, de la inversión tectónica de la Cuenca Ibérica, en la que se habían desarrollado una serie de *grabens* Pérmico-Mesozoicos. Los procesos extensionales tuvieron lugar en dos pulsos: en el Triásico Inferior y en el Cretácico Medio-Superior (p.ej. Van Wees et al., 1998). Hay dos modelos opuestos para explicar la arquitectura contractiva de la CI: como un cinturón de pliegues y cabalgamientos intraplaca (p.ej. Guimerà, 2018) o como cinturones transpresivos NO-SE (las Ramas Aragonesa y Castellana) que conectan grandes cabalgamientos E-O (Cameros-Demanda y Montalbán) (p.ej. de Vicente et al., 2019). La importancia de las fallas en dirección en el desarrollo de la CI fue ya puesta en evidencia por estudios muy tempranos (p.ej. Colomer y Santanach (1988) y ampliamente documentada para la Rama Castellana (de Vicente et al., 2009). En este trabajo, analizaremos la cinemática y la dinámica de una de las grandes estructuras de esta Rama, la Falla de Santa María del Espino (FSME), de dirección NO-SE, con tramos orientados E-O, que superpone el basamento Varisco sobre materiales mesozoicos. Contribuiremos, así, a dilucidar entre los dos modelos de deformación contractiva propuestos. La FSME se sitúa en la provincia de Guadalajara, en la mitad septentrional de la Rama Castellana de la CI y al E de la terminación nororiental de la Cuenca Cenozoica de Madrid (Fig. 1).

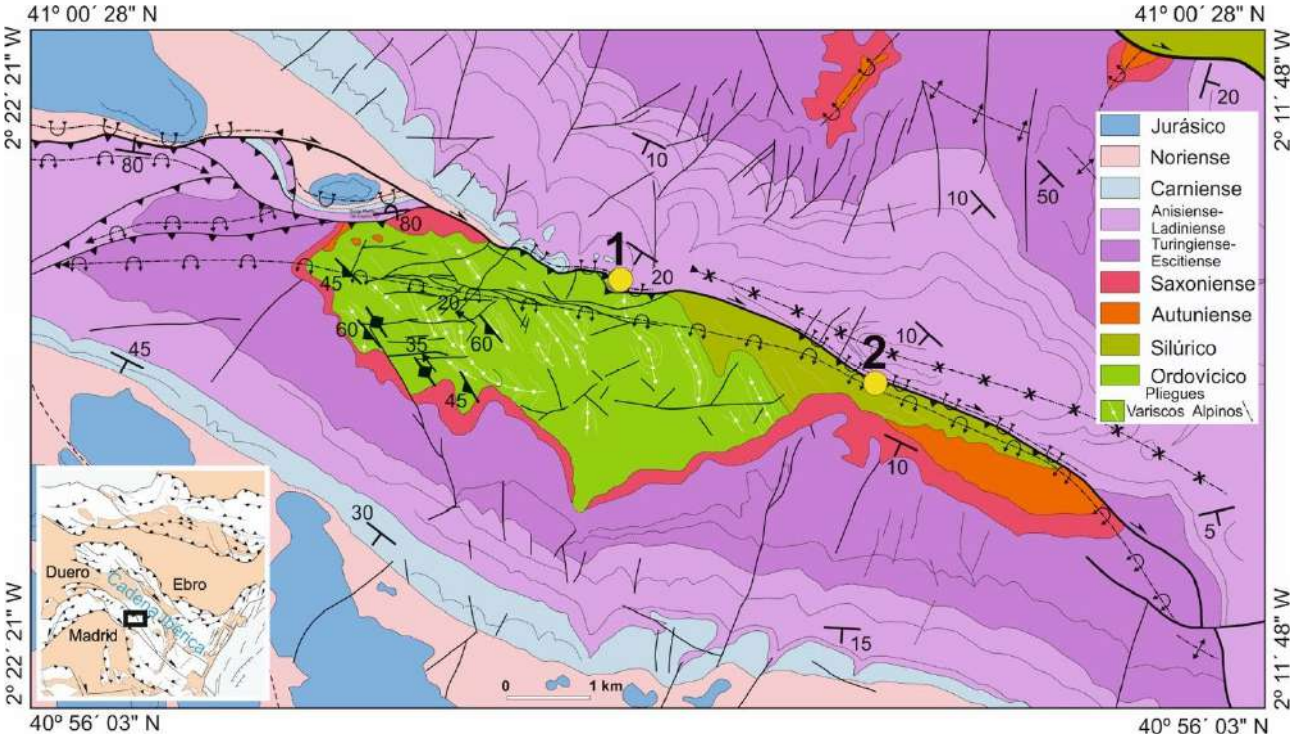


FIGURA 1. *Esquema geológico de la FSME (Rama Castellana de la CI). La situación geológica general se muestra mediante un rectángulo azul en el recuadro de la parte inferior izquierda. Las líneas finas representan trazas de capas. Los puntos 1 y 2 señalan la posición de las estaciones de toma de datos estructurales utilizados en el análisis cinemático de la falla. Pérmico y Triásico modificado de Ramos (1979).*

DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

La FSME, con unos 15 km de longitud, se orienta en dirección NO-SE con segmentos E-O y NNO-SSE, buzando entre 50º y 70º hacia el SO (Fig. 2). Ha sido descrita clásicamente como una falla inversa, que superpone en su parte central materiales del basamento varisco (ordovícicos y silúricos) sobre sedimentos mesozoicos, principalmente del Triásico (Figs. 1 y 2).



FIGURA 2. *Aspecto de campo de la traza principal de la FSME, poniendo en contacto pizarras y cuarcitas del Ordovícico superior (derecha) con conglomerados, areniscas y arcillas de la facies Buntsandstein (izquierda). A un lado y otro las rocas afectadas muestran zonas de deformación con desarrollo de diversos tipos de estructuras (ver texto principal).*

En el extremo noroccidental de la falla se observa un tramo con orientaciones E-O, apareciendo dúplexes y una ramificación de tipo *splay*. En el extremo suroriental la falla se incurva hacia una dirección NNO-SSE, disminuyendo la separación y generándose una terminación con fracturas escalonadas.

Con objeto de obtener una descripción lo más completa posible de la falla, se han realizado dos estaciones de toma de datos estructurales (Fig. 1, estaciones 1 y 2). Además del plano de falla principal (Fig. 2, estación 1), se observan numerosas fallas menores asociadas. Los criterios cinemáticos de todas ellas indican un deslizamiento oblicuo, con una componente lateral derecha, además de la componente inversa en buzamiento (Fig. 3A, estación 1). Aparte del propio plano de falla, marcado por la presencia de una roca de falla de varios decímetros a unos pocos metros de grosor, se observa una zona de deformación que afecta tanto al basamento varisco como a la cobertera mesozoica, y que presenta decenas a centenares de metros de potencia. Entre las estructuras asociadas al movimiento de la falla, en la zona de deformación mencionada, se puede citar la aparición de pliegues alpinos afectando al basamento varisco. Estos pliegues presentan una longitud de onda decamétrica a centimétrica, tendiendo a ser angulares y asimétricos. Sus charnelas se presentan dispersas, variando entre verticales a ligeramente inclinadas hacia el ENE, con escasas diferencias entre las desarrolladas en pizarras y en cuarcitas del Ordovícico (Fig. 3B, estación 1). Por su parte, las pizarras del Silúrico muestran sistemas de *kink bands*, mayoritariamente con asimetría en S, cuyos ejes se inclinan fuertemente hacia el SO (Fig. 3C, estación 2). En lo referente a los materiales del Buntsandstein, sus superficies de estratificación forman en las cercanías de la falla sinclinales de longitud de onda hectométrica a kilométrica, con charnelas subhorizontales, de dirección NO-SE (Figs. 1 y 3D, estaciones 1 y 2). Es habitual que el flanco sur de los sinclinales esté verticalizado, e incluso aparezca invertido junto a la falla, afectado por numerosas fallas menores que producen repeticiones e imbricaciones tectónicas de los distintos niveles estratigráficos.

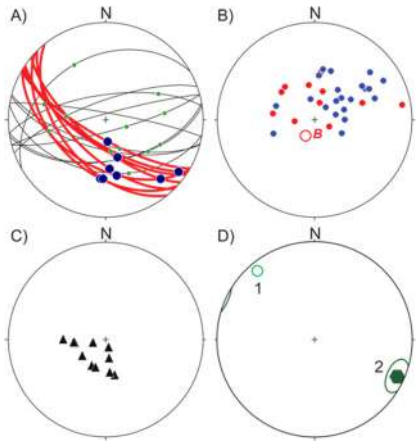


FIGURA 3. *Orientación de las principales estructuras asociadas a la FSME medidas en las estaciones 1 y 2. Proyección equiareal, hemisferio inferior. A) Planos de falla (círculos mayores) y estrías (puntos) en la estación 1. Las asociadas al plano de falla principal se muestran en rojo y las estrías en azul. Los planos secundarios en negros y las estrías en verde. En todos los casos la componente de desplazamiento en buzamiento es inversa. B) Líneas de charnela de pliegues centimétricos a decimétricos en los materiales ordovícicos (cuarcitas, en rojo, pizarras en azul), estación 1. El círculo rojo marcado con la letra B indica la orientación del eje estadístico de un pliegue decamétrico. C) Ejes de* kink bands *afectando a las pizarras silúricas en la estación 2. D) Ejes estadísticos de los pliegues del Buntsandstein en las estaciones 1 y 2.*

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA FALLA

Análisis cinemático:

De acuerdo con las características estructurales de la FSME, ha sido posible efectuar un estudio cinemático de su zona de deformación mediante el modelo analítico de zonas de cizalla presentado por Fernández y Díaz Azpiroz (2009). Los datos tomados en la estación 1 (Figs. 1, 2 y 3) han permitido obtener una orientación media para el plano de falla de N130ºE/70ºSO, con un cabeceo de 63º al SE para la estría promedio (componente de cizalla simple, Fig. 4A). El desplazamiento en la zona de deformación es inverso-dextral. Los datos disponibles han sido comparados con un modelo de transpresión (que incluye la cizalla simple como un caso extremo), por lo que se ha asumido la posible actuación de una componente coaxial de cizalla pura. Se han explorado siete posibles orientaciones de la dirección de máximo estiramiento (dirección de extrusión) de la componente coaxial (Fig. 4A). Finalmente, para considerar la vorticidad del flujo se han tenido en cuenta hasta nueve valores del número de vorticidad cinemático (W_k = 0.1, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.81, 0.9, 0.99, 0.9999). El modelo analítico permite predecir las orientaciones teóricas de los pliegues generados tanto en el basamento varisco como en la cobertera triásica, que variarán de acuerdo con la orientación inicial de las superficies plegadas (distintas en el Paleozoico –N128ºE/62ºNE–, y en el Buntsandstein –sub-horizontales) y con el valor concreto asignado a las variables del modelo (dirección de extrusión, valor de vorticidad y magnitud de la deformación finita). Estas predicciones son comparadas con los datos medidos en las estaciones 1 y 2 (Fig. 3), lo que permite constreñir el rango de condiciones cinemáticas que explican la deformación observada y, en su caso, llegar a establecer la dirección de convergencia entre los bloques separados por la falla. En este trabajo sólo se muestran los resultados con los que se han obtenido los mejores ajustes entre el modelo cinemático y los datos observados (Fig. 4). Las predicciones del modelo para un cabeceo de la dirección de extrusión de 150º (Fig. 4A) suponen un ajuste del 80% de los pliegues del Ordovícico, con más del 60% de los datos explicados con las trayectorias correspondientes a vorticidades de entre 0.6 y 0.9999 (Fig. 4B). Por su parte, los pliegues que afectan a los materiales triásicos (al menos en la estación 2) se pueden ajustar con valores similares de las variables del modelo y números de vorticidad de entre 0.6 y 0.9 (Fig. 4C). Conjuntamente, todas estas estructuras pueden explicarse mediante una zona de cizalla transpresiva ligeramente triclínica, con un cabeceo de la dirección de extrusión de 150º (aunque es posible también obtener ajustes razonables con cabeceos de hasta 170º) y valores de W_k en el rango de 0.7 a 0.9.

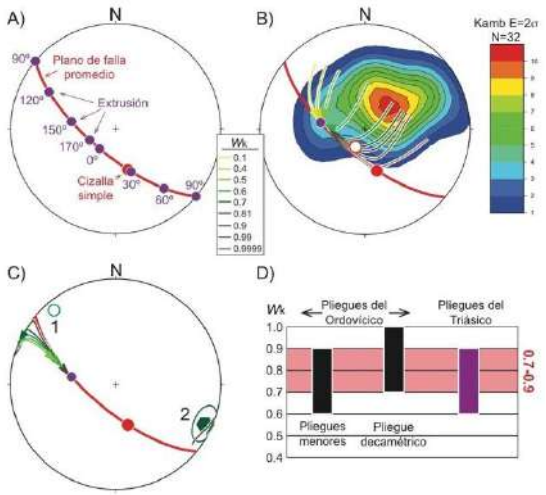


FIGURA 4. *(A) Orientación promedio de la FSME (círculo mayor rojo) y de la dirección de cizalla simple (punto rojo), así como las diferentes posiciones de la dirección de extrusión (puntos morados) considerados en el modelo cinemático. (B) Diagrama de densidad de las charnelas de los pliegues menores del Ordovícico y posición del pliegue decamétrico (círculo blanco con borde rojo) sobre los que se han representado los resultados del modelo cinemático para un cabeceo de la extrusión de 150º y distintos valores de* W_k. *(C) Orientación de los ejes estadísticos de los pliegues del Buntsandstein en las cercanías de la falla para las estaciones 1 y 2 (en ésta última se representa también un cono de confianza al 95%), junto con las trayectorias predichas por el modelo bajo las mismas condiciones que en la Figura 4B (*W_k *sólo entre 0.5 y 0.9). (A) a (C): Proyección equiareal, hemisferio inferior. (D) Valores del número de vorticidad que producen los mejores ajustes entre el modelo y la realidad para los distintos tipos de estructuras analizadas.*

Análisis dinámico:

Los *kink bands* que afectan a las pizarras del Silúrico en la estación 2 han sido analizados para determinar la orientación de los ejes principales del esfuerzo (método de Ramsay y Huber, 1987) responsables de su formación. El resultado obtenido (Fig. 5A) indica una orientación NO-SE, horizontal, para el máximo esfuerzo compresivo (σ_1). Por su parte, la inversión de esfuerzos sobre la muestra de fallas de la estación 1 (Fig. 3A), de acuerdo con el método propuesto por Reches et al., (1992), que es uno de los más restrictivos y obliga a los planos de falla a vencer la resistencia friccional, muestra la misma

disposición de Δ_1 (Fig. 5B). El cálculo de la apófisis oblicua de flujo para los resultados óptimos del modelo cinemático sugiere una dirección de convergencia NNO-SSE para los bloques separados por la FSME (Fig. 5C). Finalmente, los resultados del modelo analítico apuntan a una transpresión triclínica en el límite entre el dominio de la cizalla simple y la cizalla pura (Fig. 5D).

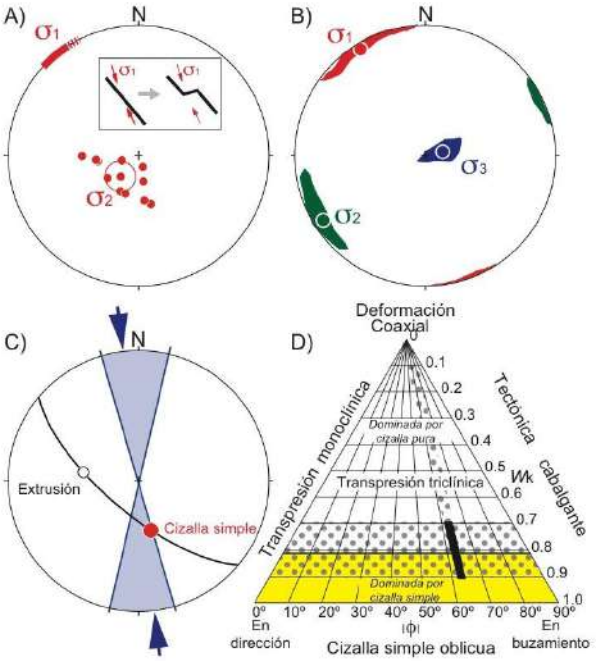


FIGURA 5. *(A) Determinación de los ejes principales del esfuerzo a partir de los* kink bands *medidos en la estación 2. (B) Estimación de la orientación de los ejes principales del esfuerzo mediante el análisis poblacional de las fallas de la estación 1. (C) Rango de orientaciones del vector de convergencia entre los bloques separados por la FSME calculado a partir del modelo cinemático (vectores azules: mejor estimación). (A) a (C), proyección equiareal, hemisferio inferior. (D) Diagrama triangular de transpresión indicando la posición de la zona de deformación de la FSME (línea negra gruesa).*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del modelo cinemático indican una convergencia en dirección N-S a NNO-SSE para los bloques separados por la FSME. La cinemática de la falla sería transpresiva triclínica (con un ángulo de deflexión cercano a los 70º), de componente horizontal derecho de movimiento horizontal, con un flujo en el límite entre el predominio de la cizalla simple y el de la cizalla pura. Hay una diferencia de unos 20º a 30º entre la dirección de convergencia obtenida mediante el estudio cinemático y la orientación de Δ_1 obtenida del estudio de los *kink bands* y de la orientación de los esfuerzos principales a partir del análisis poblacional de fallas. Se hace notar que la dirección de convergencia es la apófisis oblicua del flujo, no la dirección de máximo acortamiento infinitesimal. Por otro lado, es esperable una reorientación de Δ_1 en las cercanías de la falla. La representación de la dirección de convergencia en un mapa regional (Fig. 6) muestra cómo el estudio detallado, cinemático y dinámico de la FSME coincide plenamente con los modelos que proponen una evolución transpresiva para la Rama Castellana de la CI.

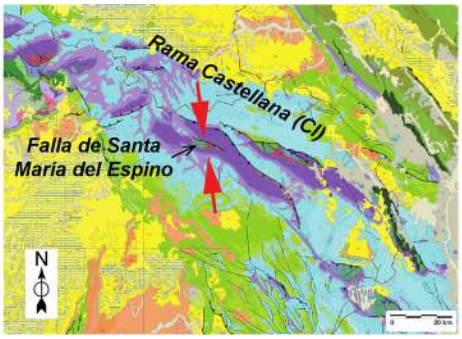


FIGURA 6. *Esquema geológico de la parte central de la Rama Castellana de la CI mostrando la dirección de convergencia (flecha roja) obtenida en este trabajo (cartografía geológica: Visor IGME, descarga 21 de enero de 2024).*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de los siguientes proyectos: PGC2018-095999-B-I00, PID2021-124155NB-C31 y PID2021-126347NB-IOO

REFERENCIAS

Colomer, M. y Santanach, P. (1988): Estructura y evolución del borde sur-occidental de la Fosa de Calatayud-Daroca. *Geogaceta*, 4: 29-31.

de Vicente, G., Vegas, R., Muñoz-Martín, A., Van Wees, J.D., Casas-Sáinz, A., Sopeña, A., Sánchez-Moya, Y., Arche, A., López-Gómez, J., Olaiz, A. y Fernández-Lozano, J. (2009): Oblique strain partitioning and transpression on an inverted rift: The Castilian Branch of the Iberian Chain. *Tectonophysics*, 465: 224-242. doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.003

de Vicente, G., Casas-Sainz, A. y Vegas, R. (2019): The Iberian Chain and the Catalan Coastal Ranges. En: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach* (J.J. Álvaro, C. Quesada y J.T. Oliveira, eds.). Regional Geology Reviews v. 3,512-518.

Fernández, C. y Díaz Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255-1269.

Guimerà, J. (2018): Structure of an intraplate fold-and-thrust belt: The Iberian Chain. A synthesis. *Geologica Acta*, 16: 427-438.

Ramos, A. (1979): Estratigrafía y paleogeografía del Pérmico y Triásico al oeste de Molina de Aragón (prov. De Guadalajara). Tesis, Universidad Complutense de Madrid, 313 pp.

Ramsay, J.G. y Huber, M.I. (1987): *The techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures*. Academic Press, London, 391 p.

Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1992): Constraints on the strength of the Upper Crust from stress inversion of fault slip data. *Journal of Geophysical Research,* 97: 12.481-12.493.

Van Wees, J.D., Arche, A., Beijdorff, C.G., Lopez-Gomez, J. Y Cloetingh, S. (1998): Temporal and spatial variations in tectonic subsidence in the Iberian Basin (E Spain). *Tectonophysics*, 300: 285–310.