

Distribución y geometría 3D de las fallas supra-sal messiniense de la Cuenca Levantina ("offshore" de Israel)

Distribution and 3D geometry of the faults overlying the Messinian salt in the Levant Basin (offshore Israel)

Adrián Hidalgo Puyou¹ y Juan Ignacio Soto Hermoso²

¹ Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva, 18071 - Granada, España. ahpuyou91@correo.ugr.es

² Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva, 18071 - Granada, España. jsoto@ugr.es

RESUMEN

Se presenta un análisis estructural tridimensional de la secuencia suprasal messiniense en la Cuenca Levantina (Israel), utilizando un cubo sísmico migrado en profundidad. Se han interpretado las principales fallas y discontinuidades en la secuencia sedimentaria plio-cuaternaria, diferenciándose dos unidades sísmo-estratigráficas pliocenas y dos cuaternarias. La secuencia suprasal está deformada por sistemas de fallas normales conjugadas, planas, despegadas sobre la sal, orientadas NE-SO y con buzamientos tanto hacia la cuenca (NO) como hacia el continente (SE). El fallamiento se inició hacia el final del Plioceno, teniendo un movimiento mayor, de carácter sin-sedimentario, durante todo el Cuaternario. El fallamiento se produjo a la par que la sal messiniense se deslizaba pendiente abajo en la cuenca, hinchándose en la región distal y fluyendo bajo fallas frágiles plio-cuaternarias, de tipo dominó.

Palabras clave: Cuenca Levantina, tectónica salina, fallas normales conjugadas, fallas de tipo dominó.

Geogaceta, 69 (2021), 11-14
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Una parte de las reservas mundiales de hidrocarburos se encuentra asociadas a depósitos evaporíticos, ya que la capa de sal puede actuar como sello (e.g., Jackson y Hudec, 2017). Por este motivo, el estudio de los procesos de tectónica salina ha experimentado en los últimos años un interés creciente.

El relleno de la Cuenca Levantina está dominado por una gruesa capa de sal, que ha condicionado su actividad tectónica desde el Plioceno a la actualidad. Esta capa de sal se extiende por todo el Mediterráneo, y se formó durante la crisis de salinidad del Messiniense (e.g., Hsü *et al.*, 1973).

El objetivo principal de este trabajo es estudiar y analizar la geometría tridimensional de las fallas que afectan a la secuencia suprasalina en el sector suroriental de la Cuenca Levantina en aguas de Israel (Fig. 1), así como valorar su relación con la geometría general de la capa salina infrayacente. El trabajo se ha realizado mediante la interpretación de un cubo de sísmica 3D migrado en profundidad.

Marco tectónico

La Cuenca Levantina se ha visto afectada por una etapa de extensión ("rifting") desde el Triásico hasta el Jurásico medio. Esta etapa de "rifting" está relacionada con la apertura del Tetis, y estuvo acompañada por el desarrollo de una plataforma carbonatada y un importante vulcanismo de tipo alcalino (Hawie *et al.*, 2013; Gardosh y Tannenbaum, 2014).

Desde el Jurásico medio hasta el Cretácico superior (Turoniense), la cuenca experimentó una gran subsidencia, depositándose importantes sucesiones detríticas en un ambiente marino profundo. Desde el Turoniense hasta el Oligoceno, dentro de la orogenia Alpina, la Cuenca Levantina se invirtió parcialmente generando un cinturón de pliegues y cabalgamientos. Este periodo se conoce en la región como la etapa del Arco Sirio.

Durante la etapa tectónica más reciente (desde el Oligoceno superior a la actualidad) se generó el sistema de la falla transformante izquierda del Mar Muerto,

ABSTRACT

The three-dimensional geometry of the structures affecting the suprasalt sequences above the Messinian salt in the Levant Basin (offshore Israel) is reconstructed using a depth-migrated seismic cube. We have interpreted in 3D the main faults affecting the suprasalt sequence, in where two Pliocene and two Quaternary seismic units have been distinguished. The suprasalt deformation is accomplished by NE-SW trending, conjugate normal faults, with planar fractures detached along the salt-top surface, and dipping both basinwards (NW) and towards the continent (SE). Faulting was initiated towards the end of the Upper Pliocene, with a major syn-sedimentary event occurring throughout the Quaternary. Syn-sedimentary faulting accompanied the down-slope gliding of the Messinian salt, expressed by distal up-building and local down-building or upbuilding in the marginal domain, in response to brittle, domino-like Plio-Quaternary faulting.

Key-words: Levant Basin, salt tectonics, conjugate normal faults, domino-like faulting.

Fecha de recepción: 13/06/2020
Fecha de revisión: 23/10/2020
Fecha de aceptación: 27/11/2020

así como la apertura del Mar Rojo (Fig. 1). Durante esta última etapa, y al final del Mioceno superior (~5,3 Ma), tuvo lugar la crisis de salinidad del Messiniense, depositándose en la cuenca una potente capa de sal (1,5 km de espesor) (e.g., Hsü *et al.*, 1977). El nivel del mar ascendió de nuevo durante el Plioceno, convirtiéndose el actual río Nilo en la fuente principal de sedimentos para la Cuenca Levantina (e.g. Gardosh *et al.*, 2008; Schattner *et al.*, 2017).

Cubo sísmico 3D

El cubo sísmico utilizado en este trabajo tiene un área aproximada de 525 km², con un espaciado de 12,5 m entre "inlines" y 25 m para las "crosslines". Es un volumen migrado en profundidad (PSDM) con un modelo de velocidad tridimensional, cuyos detalles pueden verse en Feng y Reshef (2016). La posición exacta del cubo y toda la información por debajo de la sal messiniense no se muestran por cuestiones de confidencialidad.



Fig. 1.- Mapa tectónico simplificado de la Cuenca Levantina en el Mediterráneo oriental (modificado de Ben-Avraham et al., 2006). Se señala también la posición aproximada del área de estudio.

Fig. 1.- Simplified tectonic map of the Levant Basin in the eastern Mediterranean (modified from Ben-Avraham et al., 2006). Colored rectangle shows the approximate position of the study area.

Sucesión sismo-estratigráfica

Atendiendo a las características de reflectividad, la geometría interna y la presencia de discontinuidades sísmicas, se han distinguido cuatro unidades sismo-estratigráficas en la secuencia suprasalina. Estas unidades coinciden también con las diferenciadas por Schattner et al. (2017). La crono-estratigrafía establecida por estos autores es la que hemos seguido en nuestro trabajo (Fig. 2). La sal messiniense está formada por varios ciclos de halita transparentes, separados por delgados niveles reflectivos de lutitas (e.g., Feng y Reshef, 2016).

Las cuatro unidades diferenciadas en la secuencia suprasalina son, de muro a techo (Fig. 2):

Unidad P1 (Plioceno Inferior): Esta unidad tiene como base el techo de la sal (~5,3 Ma) y su techo corresponde con una suave discontinuidad sísmica de edad fini-Plioceno inferior (~3,8 Ma). Esta unidad tiene una geometría tabular, con un espesor constante de 270-300 m. La facies sísmica de la Unidad P1 se caracteriza por reflexiones continuas de moderada reflectividad. Por la descripción

de pozos, se conoce que P1 está formada por sedimentos hemipelágicos (Schattner et al., 2017).

Unidad P2 (Plioceno Superior): Esta unidad está limitada por dos discontinuidades sísmicas. La superior corresponde con una discordancia erosiva, mientras que la inferior es una superficie con geometría de tipo "onlap". La edad aproximada de ambas discontinuidades, establecida por Schattner et al. (2017), es de ~2,6 y ~3,8 Ma, respectivamente, por lo que la unidad representa el Plioceno superior. La Unidad P2 tiene una geometría de cuña suave, engrosándose hacia el NO y con un espesor medio de 100 m. Su facies sísmica es laminada con reflexiones continuas de baja a moderada reflectividad.

Unidad PL1 (Pleistoceno inferior): La característica principal de esta unidad es el carácter de sus facies sísmicas (caóticas), así como la existencia de varias discontinuidades internas de tipo erosivo. Por la dificultad de correlación sísmica de estas superficies, se ha optado por tratar como una única unidad a este paquete, cuyo techo pasa a ser progresivamente un conjunto de reflexiones paralelas de suave reflectividad (Fig. 2). Lateralmente, la reflexión de techo pasa a ser también una discordancia angular con las sucesiones a muro y techo. El espesor de esta unidad es de unos 400 m, disminuyendo suavemente hacia el NO (según la actual pendiente batimétrica). Estimamos que la edad aproximada del techo es de ~0,9 Ma (fini-Calabriense), por lo que la Unidad PL2 sería de edad Pleistoceno inferior, incluyendo el Gelasiano y gran parte del Calabriense (~2,6-0,9 Ma). Por sus facies sísmicas, interpretamos que una buena parte de la unidad corresponde a varios complejos amalgamados de transporte en masa ("mass transport complex").

Unidad PL2 (Pleistoceno medio a Holoceno): Esta unidad contiene a los sedimentos más recientes, hasta el fondo marino (Fig. 2), por lo que su edad se extiende desde el Pleistoceno medio a la actualidad (<0,9 Ma). La potencia máxima de la Unidad PL2 es de 200 m, disminuyendo progresivamente hacia el NO. La facies sísmica es planar, con reflexiones internas paralelas de moderada a baja reflectividad.

Geometría 3D de las fallas y de la sal messiniense

El estilo estructural y las relaciones geométricas con los sedimentos

plio-cuaternarios que suelen observarse en la Cuenca Levantina se ilustran en el perfil sísmico de la Fig. 3. Se ha optado por presentar el perfil sísmico (Fig. 3) con una escala vertical exagerada para poder mostrar mejor las relaciones geométricas entre las fallas y con las unidades sísmicas. Los resultados de nuestro estudio se ilustran también con dos mapas estructurales: el correspondiente al espesor de la sal messiniense (Fig. 4a) y la estructuración de la base de la Unidad PL1, superficie clave de la sucesión suprasalina (Fig. 4b). El mapa estructural de la Fig. 4b recoge también las terminaciones laterales de las fallas, la magnitud en planta de sus desplazamientos, así como los pliegues.

La geometría general de la sal messiniense muestra dos rasgos mayores. Por un lado, el engrosamiento general de la sal hacia el NO (alcanzando allí valores de 0,9-1,1 km; Fig. 4a). Y por otro, el efecto local de las fallas suprasalinas, especialmente abundantes en el SE, con variaciones locales del espesor salino, según se esté bajo la terminación inferior de una falla o en su bloque de muro (cf. Figs. 3 y 4a).

La mayoría de las fallas suprasalinas son planas, pero se han encontrado también algunas con geometría lítrica (cóncavas hacia arriba). En general, las fallas tienen un buzamiento mayor hacia su terminación superior (Fig. 3) y la orientación general es NE-SO (Fig. 4b), buzando mayoritariamente hacia el NO, con algu-

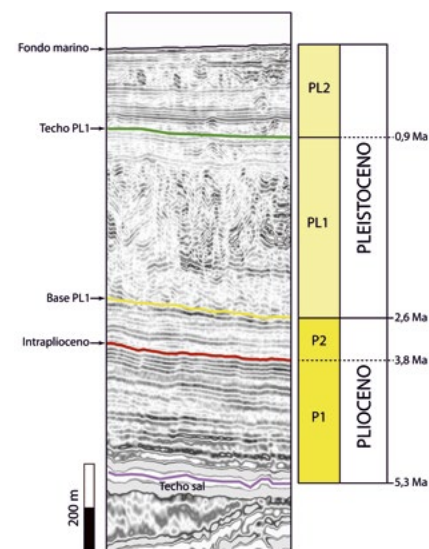


Fig. 2.- Unidades sismo-estratigráficas diferenciadas en la secuencia suprasalina plio-cuaternaria de la Cuenca Levantina. Edades tomadas de Schattner et al. (2017).

Fig. 2.- Seismo-stratigraphic units of the suprasalt Plio-Quaternary sequence in the Levant Basin. Timing is taken from Schattner et al. (2017).

nos segmentos menos frecuentes cuyo buzamiento es contrario, hacia el SE (Fig. 3). Por su abundancia relativa, interpretamos que las fallas buzantes hacia el NO corresponden con fracturas sintéticas (fallas S), mientras que las inclinadas hacia el SE serían antitéticas (fallas A). Esta interpretación viene avalada también por las relaciones de corte entre ambos sistemas de falla (Fig. 3).

Las fallas se cruzan formando un patrón en X, pero en otros casos se cortan formando patrones en Y (Fig. 3). La gran mayoría de las fallas afectan solo a las unidades PL1 y PL2 (del Cuaternario), aunque las que cortan toda la sucesión suprasalina se encuentran principalmente hacia el SE, en dirección a la región más somera de la cuenca (Figs. 3 y 4b).

La mayoría de las "tip lines" identificadas pertenecen a las fallas que cortan a las unidades P1 y P2 (del Plioceno). En este caso, las "tip lines" inferiores terminan en el techo de la sal, mientras que las "tip lines" superiores terminan justo bajo la Unidad PL1, o se adentran ligeramente en ésta.

En el caso de las fallas que cortan toda la sucesión suprasalina, sus "tip lines" superiores pueden llegar hasta el propio fondo marino, creando un escalón, o terminan ligeramente por debajo de este sin generar ninguna irregularidad (p. ej., falla A5 en Fig. 3).

Gran parte de las fallas, como por ejemplo la falla sintética mayor S11a, tiene una geometría convexa hacia techo (Fig. 4b). Los distintos segmentos de falla suelen estar solapados, de tal manera que se produce un relevo lateral entre sus terminaciones (e.g., segmentos S4a y S14 o S8 frente a S19, S9 y A5; Fig. 4b). Esta estructura correspondería a rampas de relevo lateral, sin llegar a formarse estructuras de enlace o fallas transversas de tipo "breaching ramp" (Groshong, 2006; Fossen y Rotevatn, 2016).

Junto a esto, deducimos que los desplazamientos varían a lo largo de las trazas de falla, encontrándose que en ocasiones el desplazamiento horizontal máximo se produce hacia su terminación lateral (e.g., fallas S10a, S11a, S14, S15; Fig. 4b). Las observaciones realizadas, tanto en secciones verticales como en 3D, sugieren que gran parte del desplazamiento de las fallas es de salto en buzamiento.

En cuanto a la curvatura de las fallas, se han encontrado tanto geometrías cóncavas como convexas hacia el techo (Fig.

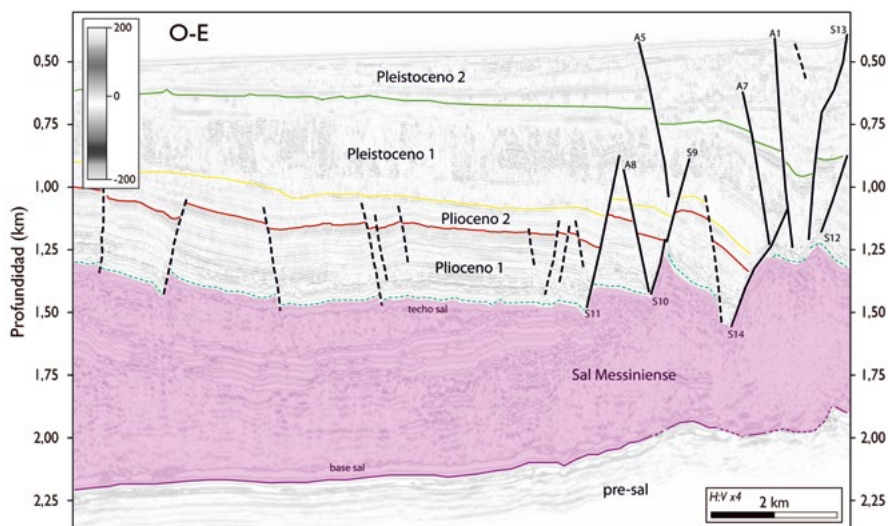


Fig. 3.- Interpretación sísmica de una sección representativa del cubo sísmico estudiado. Las fallas que no se han caracterizado en 3D se señalan con líneas discontinuas, las antitéticas se nombran con A y las sintéticas con S. Localización de la línea se muestra en la figura 4.
Fig. 3.- Interpretation of a representative seismic section extracted from the studied seismic cube. The faults that have not been characterized in 3D are shown as dashed lines, antithetic and synthetic faults are labeled with A and S, respectively. Location of the line shown in figure 4.

4b). En ambos casos, se suele desarrollar un sinclinal en el bloque de techo, cuyo eje se inclina hacia el centro de la falla (e.g., pliegues en las fallas S16, S14 y S3). En las fallas convexas, por el contrario, estos mismos sinclinales se desarrollan sobre todo en los dominios de las terminaciones laterales (e.g., S11a, S14; Fig. 4b).

Con todas estas observaciones, deducimos que el fallamiento se produjo por crecimiento lateral (en planta y en profundidad) de las fallas normales, generándose un patrón complejo de plegamiento paralelo a su traza, probablemente condicionado por la propia curvatura de las fallas, pero también por el movimiento de la sal infrayacente.

El fallamiento suprasalino estuvo acompañado de dos procesos; uno regional de flujo de la sal messiniense pendiente abajo en la cuenca (hacia el NO), mientras que hacia el margen de la cuenca la sal respondía localmente al movimiento de las fallas, siendo evacuada o ascendiendo, según se esté bajo sus bloques de techo o de muro, respectivamente (Fig. 4a).

Evolución tectónica Plio-Cuaternaria

Interpretamos que la evolución plio-cuaternaria de este sector de la Cuenca Levantina estuvo marcada por los siguientes episodios:

1) En una primera etapa pre-cine-

mática, anterior al inicio del fallamiento suprasalino, se depositó sobre la sal messiniense una unidad tabular de edad Plioceno inferior (P1, de ~5,3 a 3,8 Ma).

2) El fallamiento suprasalino se inicia con tasas pequeñas de extensión, coincidiendo con el depósito de la unidad del Plioceno superior (P2, de ~3,8 a 2,6 Ma).

3) La etapa principal de extensión sobre la sal messiniense se inició en el Pleistoceno inferior, estando acompañada del depósito de diversos flujos gravitatorios (Unidad PL1; de ~2,6 a 0,9 Ma). Esta etapa de deformación continúa hasta nuestros días, coincidiendo con el depósito de la Unidad PL2 (< 0,9 Ma). Durante esta etapa se reactivan algunas de las fallas originadas durante el intervalo de la Unidad P2, aunque fundamentalmente se generan nuevas fallas (cf. Fig. 3) de orientación NO-SE, organizadas mediante segmentos conjugados de tipo sintético y antitético (inclinados hacia el NO y SE, respectivamente), lo que provocó el basculamiento de bloques y la rotación de las fallas asociadas.

Entre la capa de sal messiniense y la secuencia suprasalina se produce durante todo el Plio-Cuaternario un despegue extensional de buzamiento muy bajo. Interpretamos que durante esta época se acentuaron o aceleraron los siguientes procesos: (a) fallamiento frágil de la zona suprasalina con geometrías de tipo dominó, (b) flujo de la lámina salina pendiente abajo en el margen y (c) flujo salino local en la región proximal, en re-

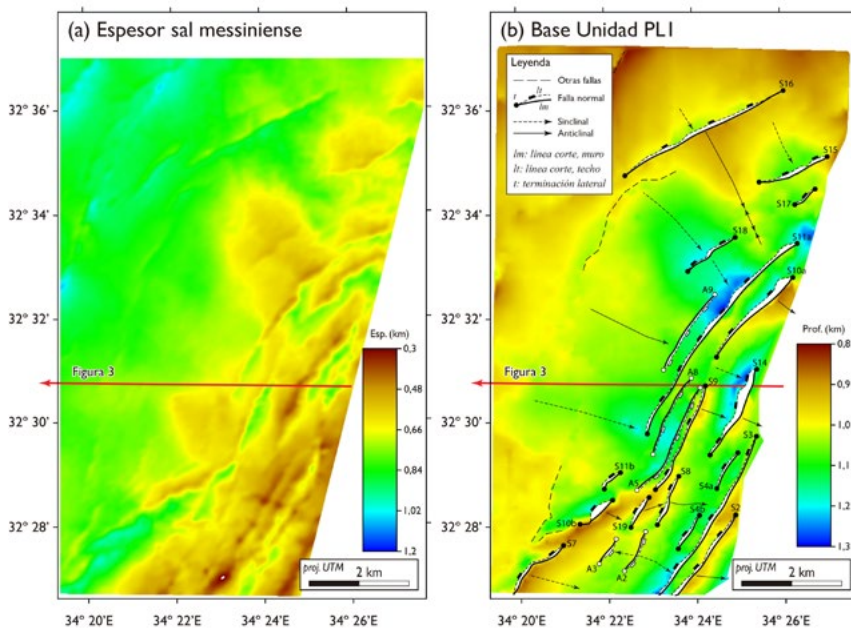


Fig. 4.- (a) Espesor vertical de la sal messiniense (en km) en el área estudiada. (b) Mapa estructural con la profundidad (en km) de la base de la unidad PL1 (Pleistoceno inferior) en el área de estudio. Las fallas sintéticas (S) se señalan con rectángulos en negro, mientras que las fallas antitéticas (A) se señalan con rectángulos en blanco. La línea roja marca la posición de la línea sísmica de la figura 3 (la flecha indica que continúa fuera del mapa). Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- (a) Vertical thickness map of the Messinian salt (in km). (b) Structural map with the depth (in km) of the Unit PL1 (Early Pleistocene). Synthetic faults (S) are marked with black rectangles, while antithetic faults (A) are marked with white rectangles. The red line marks the position of the seismic line in figure 3 (the arrow indicates that it continues off the map). See color figure in the web.

lación con el funcionamiento de las fallas suprasalinas (Figs. 3 y 4).

Conclusiones

1) El movimiento pendiente abajo del nivel de sal messiniense en la Cuenca Levantina oriental es uno de los principales mecanismos que desencadenaron la extensión en la secuencia suprasal (Plioceno-Cuaternario) de este margen.

2) Se distinguen cuatro unidades sísmo-estratigráficas en la secuencia suprasal: dos unidades de edad Plioceno y dos unidades del Cuaternario. La unidad inferior del Cuaternario (Pleistoceno inferior) se interpreta debida al depósito de varios "mass transport complex", desarrollando una marcada discordancia erosiva en su base.

3) Se identifican dos episodios de extensión en esta región. El evento más antiguo se inició con tasas moderadas hacia el final del depósito de la unidad del Plioceno superior (ca. ~2,6 Ma), y se expresa mediante fallas planas conjugadas y espaciadas. El segundo evento de

fallamiento comenzó en el Pleistoceno inferior (ca. 2,6-0,9 Ma) y continúa hasta nuestros días, sincrónico con el principal aporte de sedimentos en el margen de la Cuenca Levantina.

4) Las fallas extensionales en la secuencia suprasalina tienen una orientación general NE-SO y se dan tanto como fallas sintéticas normales que buzanan hacia el NO (es decir, hacia la parte distal de la cuenca), como otras conjugadas con buzamiento hacia el SE (es decir, hacia el continente).

5) Tanto las fallas conjugadas sintéticas como las antitéticas se caracterizan en 3D por tener segmentos con solapamientos, así como sinclinales abiertos perpendiculares, que se circunscriben a sus bloques de techo. Los desplazamientos en las fallas disminuyen hacia sus terminaciones laterales, desarrollando rampas de relevo laterales ("relay ramps") con amplios anticlinales, perpendiculares también a las líneas de corte de las fallas.

6) Se interpreta que el flujo pendiente abajo (hacia el NO) de la sal messiniense en la Cuenca Levantina condujo al falla-

miento suprasalino, principalmente desde el Pleistoceno inferior. El estilo estructural corresponde con fallas suprasalinas de tipo dominó, con rotación de bloques y despegadas a lo largo del techo de la sal. La sal messiniense fluyó de manera dúctil a la vez que el fallamiento frágil suprasalino, produciéndose el desinflado e hinchado locales en función del movimiento de los bloques de falla superiores.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor Mosh Reshef por aportar los datos sísmicos 3D sobre los que se ha llevado a cabo este trabajo. También a los revisores A. Azor y E. Roca por sus sugerencias y aportaciones, que han servido para corregir y mejorar este artículo.

Referencias

- Ben-Avraham, Z., Woodside, J., Lodolo, E., Gardosh, M., Grasso, M., Camerlenghi, A., y Vai, G. B. (2006). *Geological Society, London, Memoirs*, 32, 263-276.
- Feng, Y. E., y Reshef, M. (2016). *Petroleum Geoscience*, 22(4), 333-339.
- Fossen, H., y Rotevatn, A. (2016). *Earth-Science Reviews*, 154, 14-28.
- Gardosh, M., Druckman, Y., Buchbinder, B., y Rybakov, M. (2008). *Geophysical Institute of Israel*, 118 pp.
- Gardosh, M. A., y Tannenbaum, E. (2014). En: Marlow, L., Kendall, C., Yose, L. (Eds.), *Petroleum Systems of the Tethyan Region: AAPG Memoir*, 106, 179-216.
- Groshong Jr, R. H. (2006). *3-D Structural Geology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hawie, N., Gorini, C., Deschamps, R., Nader, F.H., Montadert, L., Granjeon, D., y Baudin, F. (2013). *Marine and Petroleum Geology*, 48, 392-410.
- Hsü, K.J., Ryan, W.B.F., y Cita, M.B. (1973). *Nature*, 242, 240-244.
- Hsü, K.J., Montadert, L., Bernoulli, D., Cita, M.B., Erickson, A., Garrison, R. E., Kidd, R.B., Mèlières, F., Müller, C., y Wright, R. (1977). *Nature*, 267 (5610), 399.
- Jackson, M. P. A., y Hudec, M. R. (2017). *Salt tectonics: Principles and practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schattner, U., Lang, G., y Lazar, M. (2017). En: Y. Enzel y O. Bar-Yosef (Eds.), *Quaternary of the Levant: Environments, Climate Change, and Humans*. Cambridge: Cambridge University Press, 63-74.