



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelización 3D del diapiro de Salinas de Rosío (Cuenca Vasco- Cantábrica)

Treball realitzat per:

César Estepa Romero

Dirigit per:

Àngels Canals Sabaté

Concepción Ayala Galán

Grau en:

Enginyeria Geològica

Barcelona, 13 de Juny de 2019

Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda de:

Intrepid Geophysics por proporcionarnos el software necesario para abordar el proyecto.

Brown, Anselmo, Paul y Darrell, por ser la mejor compañía frente al ordenador en las horas de trabajo dedicadas.

Alba, por su apoyo incondicional y comprensión durante este año.

Resumen

Las estructuras diapíricas pueden ser sello para reservorios de hidrocarburos, almacenes de gas (natural o CO₂) y/o rocas de caja para recursos minerales metálicos y no metálicos. El proyecto presente tiene como objetivo estudiar el diapiro de Salinas de Rosío (Cuenca Vasco-Cantábrica), realizando una modelización 3D mediante el uso del software *GeoModeller*.

La interpretación de estructuras geológicas a partir de métodos directos (sondeos) e indirectos (como por ejemplo sísmica de reflexión) es susceptible a errores referidos a la extensión lateral y profundidad de la misma. Las modelizaciones geológicas, mediante software que asocian información geológica y geofísica de superficie y profunda, facilitan la obtención de imágenes 3D de las estructuras, minimizando los errores y facilitando su análisis. En este trabajo se han compilado datos del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂* y se ha modelizado la estructura del diapiro de Salinas de Rosío.

La imagen obtenida nos muestra una estructura de material salino que ha ascendido 4 km desde el estrato en que se depositó, siguiendo conectado con éste. Asimismo, observamos que la zona donde la sal ha perforado los materiales que había por encima tiene aproximadamente unos 8 km de largo por 2 km de ancho en dirección E-O. En superficie, el diapiro sigue esta alineación, aunque en su parte oriental vierte hacia el Sur, cubriendo los materiales que lo rodean.

Gracias al modelo hemos podido entender las disposiciones y deformaciones de los materiales involucrados. Así, enfocado desde un estudio de presencia de hidrocarburos, disponemos de una imagen que podría marcar el punto de partida sobre la localización de las zonas donde sería más probable encontrarlos. De igual modo y continuando con el proyecto de almacenamiento de CO₂, el modelo nos permite estudiar la estructura completa ayudándonos a decidir si es rentable o no realizarlo.

Abstract

Diapiric structures can be a seal for hydrocarbon reservoirs, gas stores (natural or CO₂) and / or box rocks for metallic and non-metallic mineral resources. The present project aims to study the diapir of Salinas de Rosío (Basque-Cantabrian Basin), making a 3D modelling by using *GeoModeller* software.

The interpretation of geological structures from direct (sounding) and indirect methods (such as reflection seismic) is susceptible to errors related to the lateral extension and depth. Geological modelling, through software that associates geological and geophysical surface and deep information, helps the obtaining of 3D images of structures, minimizing errors and making easier their analysis. In this work we have compiled data from the project *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂* and the diapir structure of Salinas de Rosío has been modeled.

The image obtained shows us a structure of saline material that has ascended 4 km from the stratum in which it was deposited, still being connected with it. Also, we observed that the area where the salt has drilled the materials that were above it is approximately 8 km long and 2 km wide in the E-W direction. In surface, the diapir follows this alignment, although in its eastern part it is poured towards the South, covering the materials that surround the diapir.

Thanks to the model we have been able to understand the dispositions and deformations of the materials involved. Thus, focused from a study of the presence of hydrocarbons, we have an image that could mark the starting point on the location of the areas where it would be most likely to find them. In the same way and continuing with the CO₂ storage project, the model allows us to study the complete structure helping us to decide if it is profitable or not to do it.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 4 |
| Abstract | 5 |
| Introducción | 8 |
| Modelización tridimensional de la estructura diapírica..... | 9 |
| Historia geológica de la Cuenca Vasco-Cantábrica | 9 |
| Geología de la zona de estudio | 11 |
| Modelización geológica en GeoModeller..... | 11 |
| Discusión de los resultados | 22 |
| Referencias..... | 25 |
| Anexo I: Las fallas en el modelo | 26 |
| Anexo II: Modelo tridimensional del diapiro de Salinas de Rosío..... | 28 |

Introducción

El diapirismo salino corresponde al fenómeno de penetración y rotura de la cobertura sedimentaria por parte de masas salinas ascendentes. El movimiento espontáneo de una masa salina, normalmente es inducido debido a la inestabilidad gravitativa de la propia masa cuando soporta una potente cobertera de sedimentos más densos. Debido a la baja densidad del material salino y a su facilidad para fluir, se favorece este comportamiento diapírico.

Las estructuras diapíricas pueden funcionar como sello de reservorios de hidrocarburos, o almacenes de gas (natural o CO₂). Si en el contexto de la zona del diapiro encontramos una roca madre y un material permeable y poroso que actúe como almacén del hidrocarburo, el diapiro sellará el reservorio. Los diapiros también pueden funcionar como contenedores de recursos minerales (Pb-Zn, Sr, S, entre otros) (Fig. 1). Mediante procesos hidrotermales y/o gracias a las aguas meteóricas, se pueden acumular en los diapiros potasas, sulfatos cálcicos, azufre nativo y sulfuros metálicos. Al extruir se hace más fácil la explotación de estos materiales necesarios tanto para la industria como para la agricultura (Ortí, 2010).

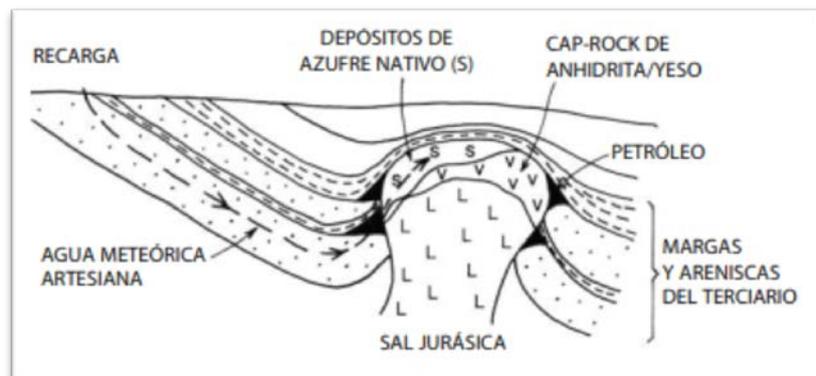


Figura 1- Esquema de un diapiro y de las posibilidades de explotación que a él se asocian (Ortí, 2010). Debido a que el diámetro de los diapiros es muy variable, la figura no dispone de escala.

Este trabajo se centra en la modelización 3D del diapiro de Salinas de Rosío, situado en la Cuenca Vasco-Cantábrica, (CVC). El diapiro de Salinas de Rosío fue objeto de estudio en el marco del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*, llevado a cabo por el Ministerio de Ciencia e Innovación, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través del Instituto Geológico y Minero de España durante los años 2009-2010. Por este motivo se dispone de datos tanto geológicos como geofísicos de superficie y de subsuelo que permiten abordar la generación del modelo 3D –su estructura profunda y su extensión lateral-. En cualquier proyecto geológico, la cartografía geológica nos proporciona el conocimiento de la geología de superficie mientras que para conocer la disposición de los materiales en el subsuelo tenemos métodos directos como

los sondeos, o métodos indirectos como la sísmica de reflexión 2D. Los sondeos nos dan una visión unidimensional, mientras que la sísmica de reflexión 2D proporciona información de estructuras a lo largo de perfiles.

Para la modelización 3D se ha utilizado el software *Geomodeller*, y ha sido necesario conocer la historia geológica de la zona, familiarizarse con el programa y gestionar toda la información disponible, ponderando los parámetros críticos para la obtención del modelo. Para ello se ha dispuesto tanto de una cartografía de superficie a escala 1:50.000, como de datos de sondeos y datos de sísmica de reflexión. Con esta información se crearon una serie de cortes geológicos (Ministerio de Ciencia e Innovación, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto Geológico y Minero de España, 2010. *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂. Cuenca Cantábrica y Cuenca del Duero –Geología de Subsuelo- Estructura Ribero*) que definen las estructuras litológicas en 2D y que han sido utilizados como datos de entrada para la modelización 3D.

Modelización tridimensional de la estructura diapírica

El diapiro de Salinas de Rosío se sitúa en la provincia de Burgos y se extiende hacia el Sur y hacia el Oeste desde el municipio que le da nombre. Éste municipio se encuentra a 70 km al Sur-Oeste de Bilbao. La zona se encuentra en el contexto de la CVC con materiales que van desde el Triásico al Neógeno. El dominio geológico abarca materiales sedimentarios como rocas detríticas, carbonatadas y evaporíticas.

Historia geológica de la Cuenca Vasco-Cantábrica

El diapiro de Salinas del Rosío forma parte de un conjunto de diapiros dentro de la CVC. Un rasgo característico de la CVC es la presencia de estructuras diapíricas, las cuales están constituidas esencialmente por materiales del Triásico, evaporitas y lutitas pertenecientes a las facies Keuper. La distribución de los afloramientos diapíricos muestra alineaciones que coinciden con las fallas del zócalo Hercínico (E-W y NNE-SSW).

A consecuencia de la separación de las placas Ibérica y Europea, en la CVC se dieron unas condiciones distensivas que produjeron un adelgazamiento de la corteza que estuvo acompañada de actividad volcánica y se desarrollaron cuencas sedimentarias subsidentes. La colisión oblicua de las placas Ibérica y Europea entre el final del Cretácico y el Mioceno, provocó la inversión de las estructuras previamente formadas, implicando el sustrato varisco (Orogenia Alpina) (Vera, 2004). La formación de la CVC puede por tanto dividirse en tres etapas: a) Una primera de Rifting durante el Triásico, b) Apertura del Golfo de Vizcaya y el Atlántico Norte durante el Albiense-Aptiense y c) Finalmente inversión tectónica que se inició en el Cretácico Superior hasta el Oligoceno.

Entre finales del Eoceno y el Oligoceno esta actividad diapírica se reactivó debido a la compresión alpina.

Etapa de Rifting

La CVC es una cuenca sedimentaria que empezó a formarse durante el Triásico (250 Ma). Debido a procesos extensionales se produjo un adelgazamiento de la corteza (Rift). Los materiales que se depositaron durante este periodo fueron conglomerados, areniscas y lutitas rojas, carbonatos y una unidad lutítica - evaporítica conocida como Facies Keuper. Las potencias de estos materiales es variable, entre 60 y 100 metros para la formación de conglomerados areniscas y lutitas, en el caso de los carbonatos el espesor es constante e igual a 20 metros (García Senz, 2001, citado por Perona, 2016), y entre 40 y 60 metros para la unidad lutítica-evaporítica. Durante el Jurásico la subsidencia se dio por adelgazamiento de la corteza a causa de procesos térmicos.

Apertura del golfo de Vizcaya y del Atlántico norte

Con la apertura del Atlántico Norte, la placa Ibérica experimentó durante el Albiense-Aptiense (100-93 Ma) una rotación antihoraria independiente del resto de Europa (Montadert et al., 1979, citado por Perona, 2016). Estas estructuras son consideradas como estructuras tectónicas tardo-hercínicas reactivadas durante el régimen transtensional del Aptiense-Albiense (Rat, 1988, citado por Perona, 2016).

Durante el Aptiense –Albiense Medio (Cretácico inferior) la corteza adelgazó debido a la separación de Iberia respecto a Europa. Se produjo una segmentación en diferentes bloques basculantes del margen ibérico debido a la subsidencia de éste. Estos mismos bloques están limitados por fallas orientadas NO-SE que dividieron la cuenca en subcuencas con subsidencia diferencial. Asimismo hubo una alta actividad diapírica (Serrano et al., 1994, citado por Perona, 2016).

Inversión tectónica (Compresión Alpina)

Durante el Cretácico Superior se inicia la compresión Alpina a causa de la convergencia de las placas Africana y Europea. Se pasó de un régimen tectónico transpresional, a transtensional en la Cuenca Vasco-Cantábrica (Choukroune et al., 1973, citado por Perona 2016). Tuvo lugar el desarrollo de un importante plegamiento, acompañado de fallas inversas y cabalgamientos. Se inició un proceso de subducción que empezó en el Cretácico superior (Cámara, 1997, citado por Perona, 2016).

A finales del Eoceno – Oligoceno (33-23 Ma) los materiales de la CVC se plegaron y sufrieron desplazamientos por cabalgamientos debido a una compresión (Ratt, 1988, citado por Perona, 2016), así como una subsidencia regional uniforme (García-Mondéjar, 1989, citado por Perona, 2016). A su vez,

las fallas que habían sido normales lístricas, cambiaron invirtieron su sentido pasando a ser cabalgamientos (Malagón et al., 1994, citado por Perona, 2016).

Ya durante el Oligoceno se cerró la CVC (Cámara, 1997, citado por Perona, 2016).

Geología de la zona de estudio

La masa salina del diapiro de Salinas del Rosío, objeto de este estudio, pertenece al material depositado durante el Triásico de facies Keuper (lutitas y evaporitas) y su movimiento ha estado provocado por la tectónica regional y por el peso de sedimentos adyacentes. De ésta manera, para definir las litologías utilizadas en la modelización 3D, se hará una división entre Triásico Keuper, que nos dará la estructura final del movimiento salino, y las capas superiores, donde podremos ver la deformación sufrida por el encajante: las zonas donde solo hay halocinesis y aquellas donde aflora el diapiro. Para el resto de materiales haremos tres divisiones: Jurásico, Cretácico y Terciario.

Modelización geológica en GeoModeller

Primero definimos el área de estudio, que en este caso la tomamos un 263% más grande de lo que en realidad queremos modelizar (100 km²) para evitar efectos de borde en la modelización. Esta zona comprende un área de 363 km² y sus coordenadas, proyección UTM huso 30 son X mínima = 450.000 m, X máxima = 472.000 m, Y mínima 4.754.000 m, Y máxima = 4.770.500 m. En profundidad modelizaremos hasta los 15.000 m bajo la superficie, y hasta los 400 m por encima de la superficie. Todos estos datos aparecen en la *Tabla 1*:

| | | | | |
|-----------|-----------|--|-------|-----------|
| X min | 450000 m | | X max | 472000 m |
| Y min | 4754000 m | | Y max | 4770500 m |
| Z min | - 15000 m | | Z max | 400 m |
| Precisión | 1 m | | | |

Tabla 1 - Coordenadas de la zona de estudio. Proyección UTM huso 30.

Tal y como se puede observar en la *Tabla 1*, hemos definido nuestra zona de estudio con una precisión de 1 metro, aunque la incertidumbre con la que trabajamos es mayor. Para introducir la topografía, al tratarse de la confluencia de 4 hojas diferentes, debe generarse un único archivo, de manera que el programa no las solape ni colapse por volumen de información. Las hojas correspondientes a esta zona geográfica son la 84, 85, 109 y 110 del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:25.000 (Fig. 2).

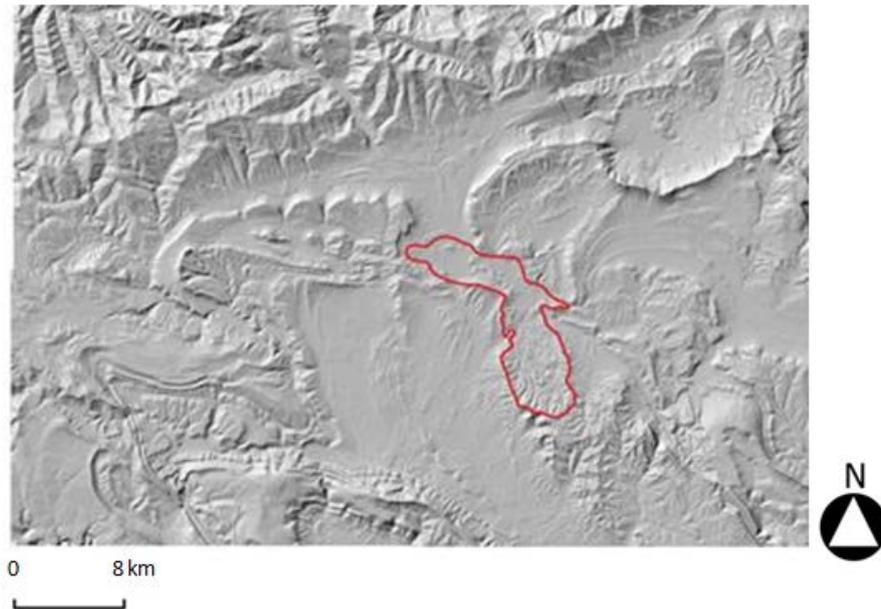


Figura 2 - Imagen del relieve que presenta el área de interés, y la localización del diapiro de Salinas de Rosío, línea roja sobre el mapa.

El diapiro de Salinas de Rosío aflora siguiendo un arco de ocho kilómetros de ancho formado por dos segmentos de orientación ONO_ESE y NNO-SSO, que forman un ángulo de 120° (Fig. 2). Debido a que el material del diapiro es más blando que el que se encuentra a su alrededor, se puede observar en la *Figura 2* que los afloramientos correspondientes a los diairos tanto de Salinas de Rosío como de Villasana de Mena (situado al NE de la zona de estudio) están a una cota inferior a la de las rocas encajantes.

La geología de superficie proviene de la cartografía Magna del Instituto Geológico y Minero de España a escala 1:50.000. En este caso hemos importado y georeferenciado cuatro hojas (número 84, 85 ,109 y 110) de la cartografía geológica.

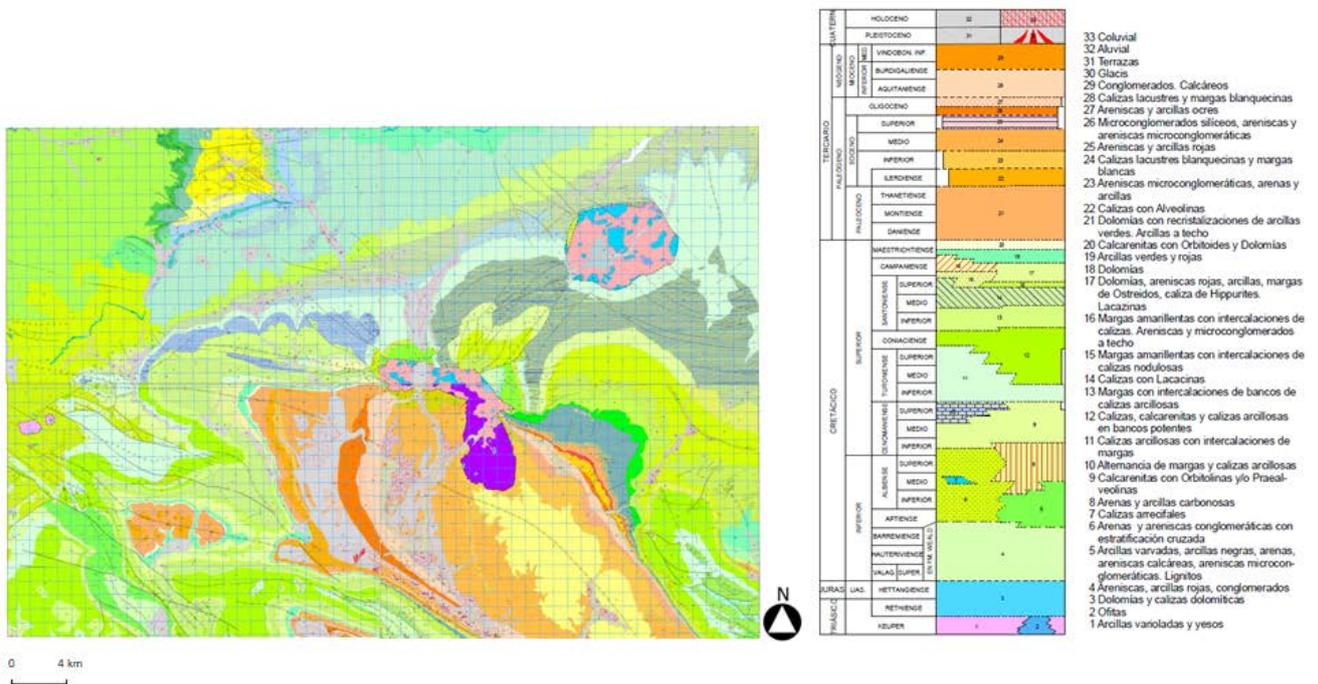


Figura 3 - Marco de la cartografía geológica donde se ubica el área de estudio (hojas 84, 85, 109 y 110, cartografía MAGNA del IGME a escala 1:50.000).

El material salino se puede identificar en las hojas de la cartografía MAGNA por el color correspondiente a los materiales del Triásico (Fig. 3) Al georeferenciar todas las hojas, el programa automáticamente elimina todo aquello que está fuera de la zona de estudio. Así, la cartografía geológica queda ajustada de la siguiente manera:

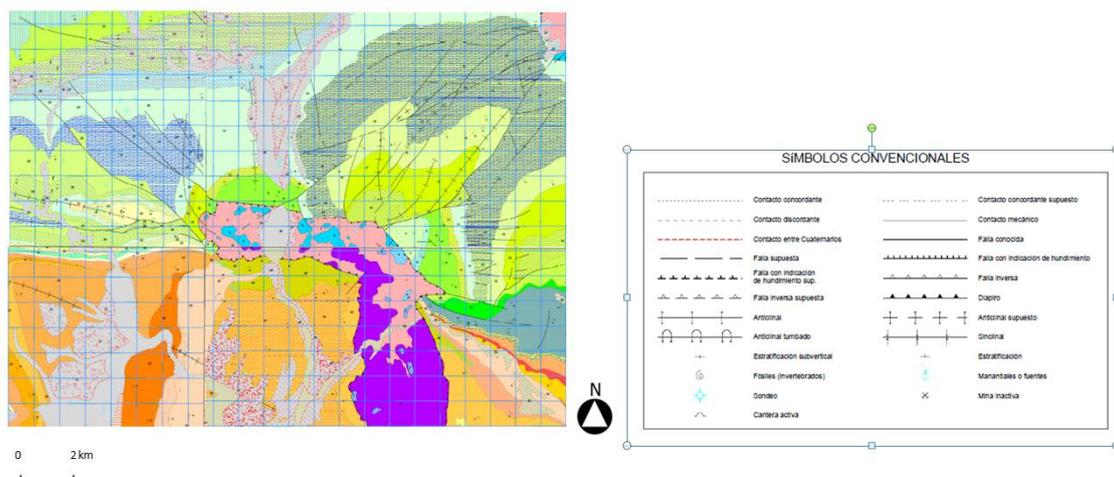


Figura 4 - Hojas de la cartografía geológica georeferenciadas en GeoModeller.

Queda de esta manera definida nuestra área de estudio, de forma geográfica, topográfica (Fig. 2) y geológica (Fig. 4). En el centro, aproximadamente, encontramos el diapiro a modelizar. Los materiales de la mitad superior (colores verdosos y azulados) pertenecen al Cretácico, mientras que los de la mitad inferior, de colores amarillos y naranjas, son Terciarios (Fig. 5).

Una vez georeferenciada la cartografía, importamos en el modelo tres cortes geológicos propios de las hojas MAGNAS (hojas 84, 85, 109 y 110), así como cuatro cortes geológicos elaborados a partir de la interpretación de los datos de sísmica de reflexión provenientes de estudios previos llevados a cabo en la zona por el Ministerio de Ciencia e Innovación, y del Ministerio de Industria, Turismo y Deporte entre los años 2009 y 2010, y elaborados a partir de datos de sísmica de reflexión.

Las coordenadas de los siete cortes geológicos se encuentran en la *Tabla 2*:

| Cortes | x (m) | y (m) | x' (m) | y' (m) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|
| II-II' 85 | 458000 | 4765678 | 467831,9 | 4761247,2 |
| IV-IV' 85 | 460634 | 4770483 | 463264 | 4762018 |
| I-I' 110 | 465037 | 4754053 | 471972 | 4760305 |
| AA' | 456000 | 4758333 | 454500 | 4768333 |
| BB' | 458333 | 4753333 | 462250 | 4770000 |
| CC' | 461000 | 4757000 | 467500 | 4769000 |
| DD' | 469400 | 4757500 | 471666 | 4769000 |

Tabla 2 - Coordenadas de los 7 cortes geológicos utilizados en la modelización. Las coordenadas x e y indican el origen del perfil y las coordenadas x' e y' indican el final de cada perfil.

El siguiente paso es definir la columna estratigráfica (pila estratigráfica en nomenclatura GeoModeller) con los materiales que vamos a modelizar. Teniendo en cuenta la información geológica disponible, se ha optado por utilizar una pila simplificada y modelizar la base de las formaciones, que en este caso es más intuitivo.

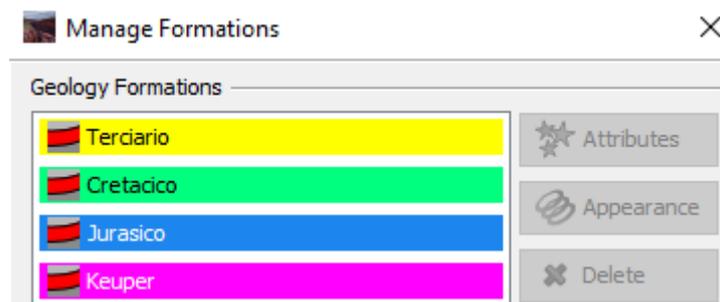


Figura 5 - Litologías que se han modelizado. La litología de la base del modelo está implementada por defecto en *GeoModeller*.

Se procede a digitalizar los contactos, fallas y buzamientos de los siete cortes geológicos de la *Tabla 2* para incorporarlos a la modelización. Para nuestro

modelo tenemos un total de 51 fallas. Debido a la división de materiales que hemos hecho, solo 8 fallas afectan a dos o más litologías, por lo que para nuestro modelo serán las que tengamos en cuenta. De todas ellas definimos a qué litologías afecta, y sus características en cuanto a profundidad, longitud en la intersección con la topografía y hasta dónde llega su influencia. Estos datos se resumen en la *Tabla 3*:

| | DIAPIR | DIAPIR 2 | F19 | F41 |
|------------------|--------|----------|------|------|
| RADIO HORIZONTAL | 6500 | 6300 | 3000 | 2500 |
| RADIO VERTICAL | 1400 | 2700 | 2800 | 3400 |
| RADIO INFLUENCIA | 6000 | 6300 | 6000 | 7000 |

| | F42 | F44 | F45 | i1 |
|------------------|------|------|------|------|
| RADIO HORIZONTAL | 3400 | 1200 | 1400 | 4300 |
| RADIO VERTICAL | 2500 | 3000 | 2700 | 6700 |
| RADIO INFLUENCIA | 6500 | 3000 | 3000 | 7000 |

Tabla 3 - Características principales de las fallas que afectan a los materiales del estudio.

De entre las 8, distinguimos 3 cabalgamientos (DIAPIR, DIAPIR 2 e i1) y 5 fallas normales (F19, F41, F42, F44 y F45) (Tabla 3). Para los sistemas de fallas hay que definir para cada una cómo se relacionan entre ellas, así como a qué materiales afectan (toda esta información referente a las fallas, tanto las modelizadas como las que solo digitalizamos, se presenta en el *Anexo I*).

La cartografía geológica se ha digitalizado a partir de los mapas georeferenciados en el programa. Aunque en el modelo solo aparezcan las ocho fallas de la *Tabla 3*, se ha digitalizado el conjunto de las 51. Para diferenciarlas les hemos dado otros colores y en el caso de los cabalgamientos que permiten la ascensión del diapiro, los hemos nombrado DIAPIR y DIAPIR 2 para facilitar su identificación.

Para que el modelo geológico sea consistente, en nuestro caso no ha bastado con la información geológica disponible, sino que hemos tenido que añadir nuevos cortes (concretamente 12) en zonas donde no disponíamos de datos para mejorar tanto el modelo como los cortes digitalizados.

Se presentan a continuación seis figuras del modelo generado. Para todos ellos, los colores de los materiales corresponden con litologías según está especificado en la *Figura 5*:

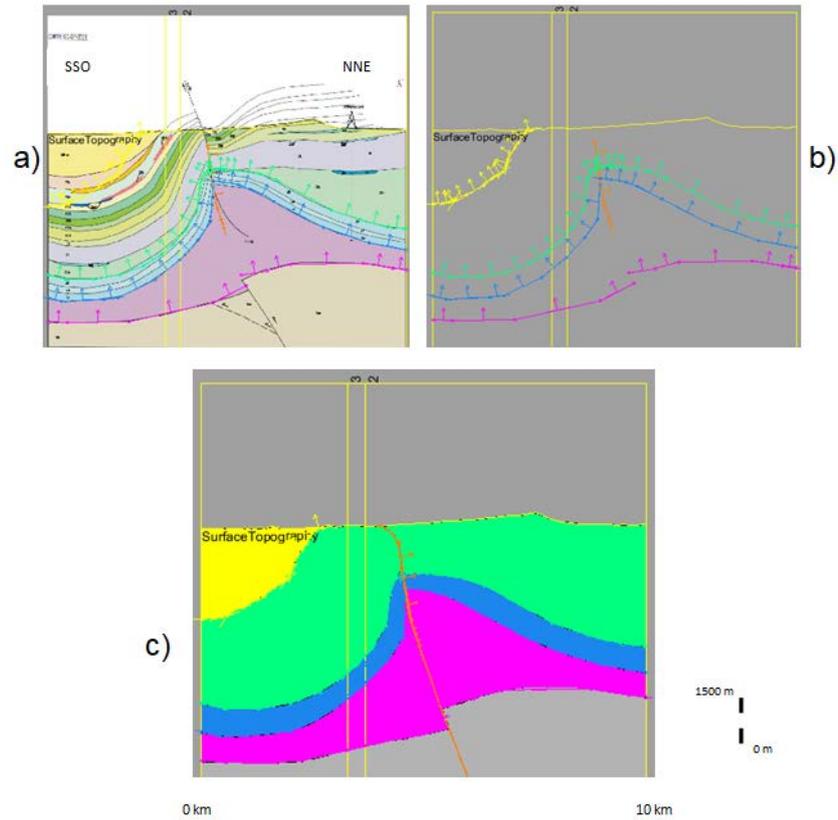


Figura 6 – Corte A-A': a) Corte geológico interpretado a partir de los estudios de sísmica de reflexión del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*; b) Digitalización del corte geológico; c) Modelo 2D generado con *GeoModeller*. Encontramos el material del Keuper en rosa, el del Jurásico en azul, el del Cretácico en verde y el del Terciario en amarillo.

Situado en la zona Este del modelo, el corte geológico A-A' de la *Figura 6* nos muestra cómo el material salino del Keuper asciende aunque no llega a perforar los materiales superiores.

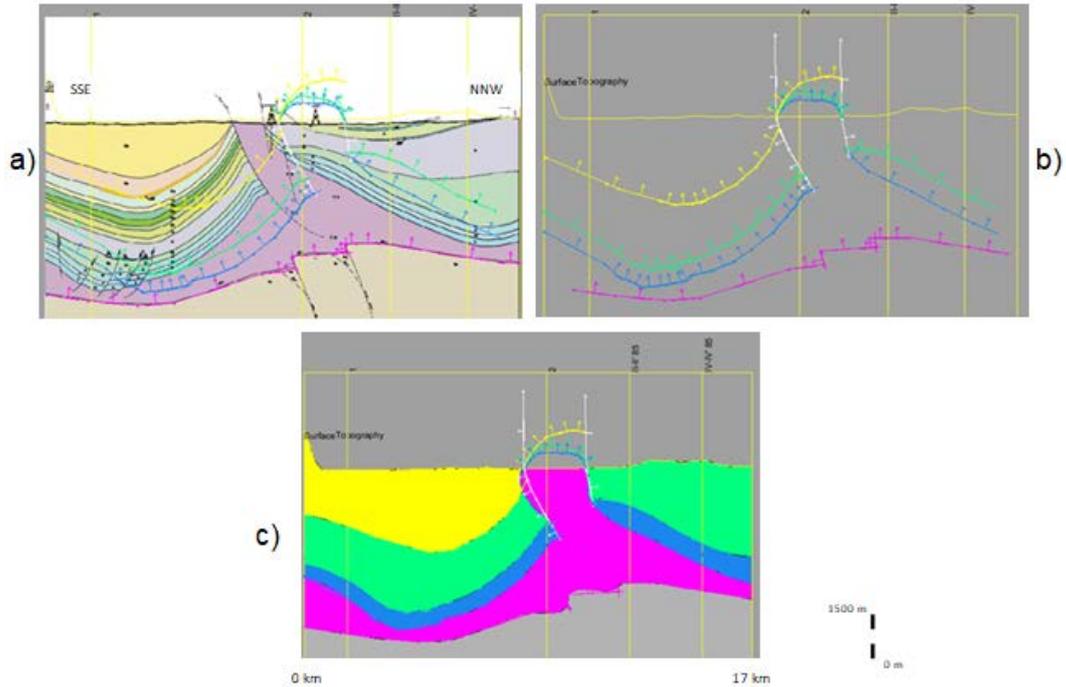


Figura 7 – Corte B-B': a) Corte geológico interpretado a partir de los estudios de sísmica de reflexión del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*; b) Digitalización del corte geológico; c) Modelo 2D generado con *GeoModeller*. Encontramos el material del Keuper en rosa, el del Jurásico en azul, el del Cretácico en verde y el del Terciario en amarillo.

Para el caso del segundo corte geológico, el B-B' (situado en la zona central del modelo y con orientación NNW-SSW, Fig 8), vemos que la digitalización no cuadra con la imagen georeferenciada de éste. La causa es que si tomamos los datos del corte interpretado a partir de un estudio de sísmica de reflexión, no coinciden los contactos en superficie del corte con los de la cartografía geológica. Es por eso que se ha decidido desplazar hacia el Norte el conjunto de los contactos y fallas digitalizados hacia el Norte, donde el material que aflora corresponde con el de las hojas de cartografía MAGNA.

Es posible que al tratarse de una interpretación y al disponer de 4 puntos a lo largo de la traza del corte (el punto inicial y final, y los correspondientes a los dos sondeos), los contactos en superficie no se hayan dibujado donde afloran.

En la *Figura 7* también se puede apreciar que hay tres contactos digitalizados por encima de la topografía, sobre el material salino que aflora. El motivo ha sido ayudar a *GeoModeller* a ajustar el modelo a la cartografía geológica, ya que en esa zona hacía aflorar material Cretácico y no el diapiro, dibujando los contactos que ya están erosionados. Por último, hay una pequeña zona en contacto con el lado Norte de la extrusión del diapiro, que en el corte interpretado aparecen unos estratos del Cretácico y que no hemos digitalizado, ya que consideramos que es el mismo material salino, solo que alterado en el borde (*Cap-rock*).

Podemos observar cómo en este caso, y a diferencia de la *Figura 6*, el material salino ha perforado los materiales del Jurásico, Cretácico y Terciario.

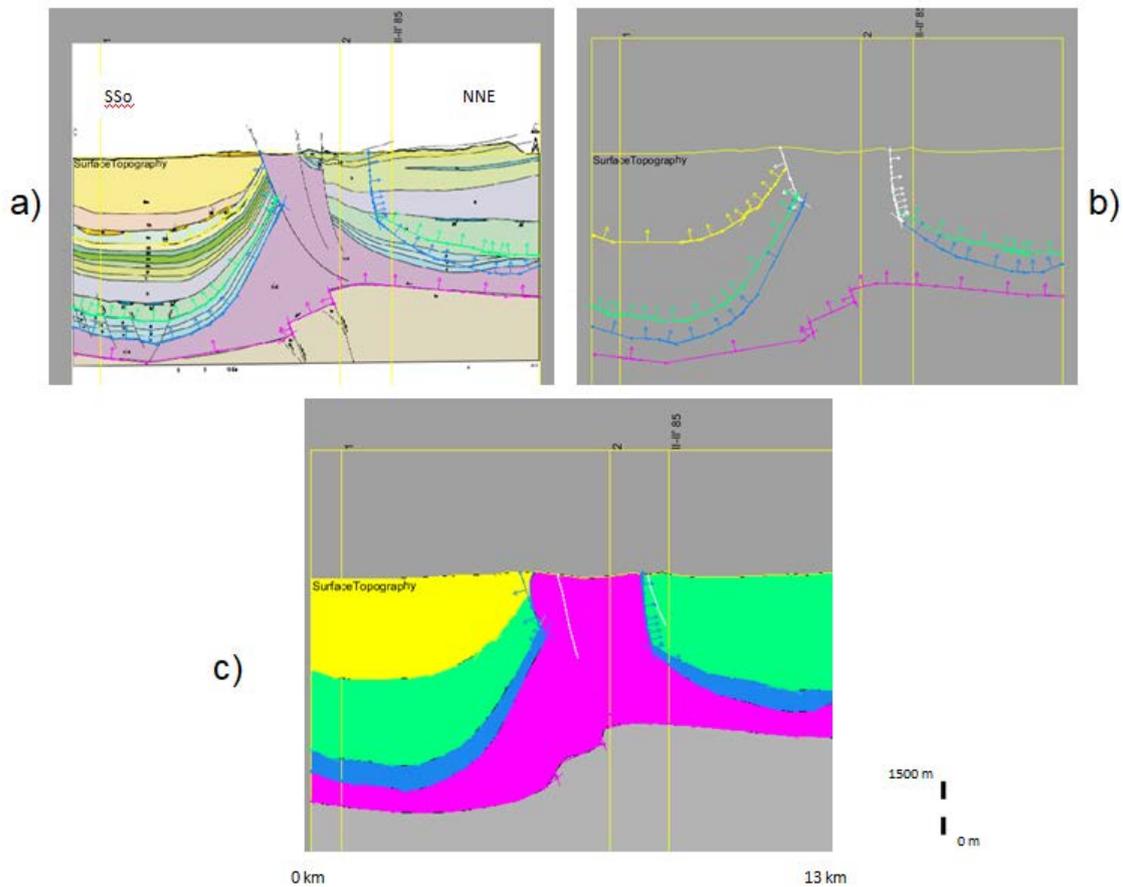


Figura 8 – Corte C-C': a) Corte geológico interpretado a partir de los estudios de sísmica de reflexión del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*; b) Digitalización del corte geológico; c) Modelo 2D generado con *GeoModeller*. Encontramos el material del Keuper en rosa, el del Jurásico en azul, el del Cretácico en verde y el del Terciario en amarillo.

El corte de la *Figura 8* geológico tiene la misma dirección que el de la *Figura 7*, pero situado 500 m más al Este, donde el diapiro empieza a extenderse hacia el Sur.

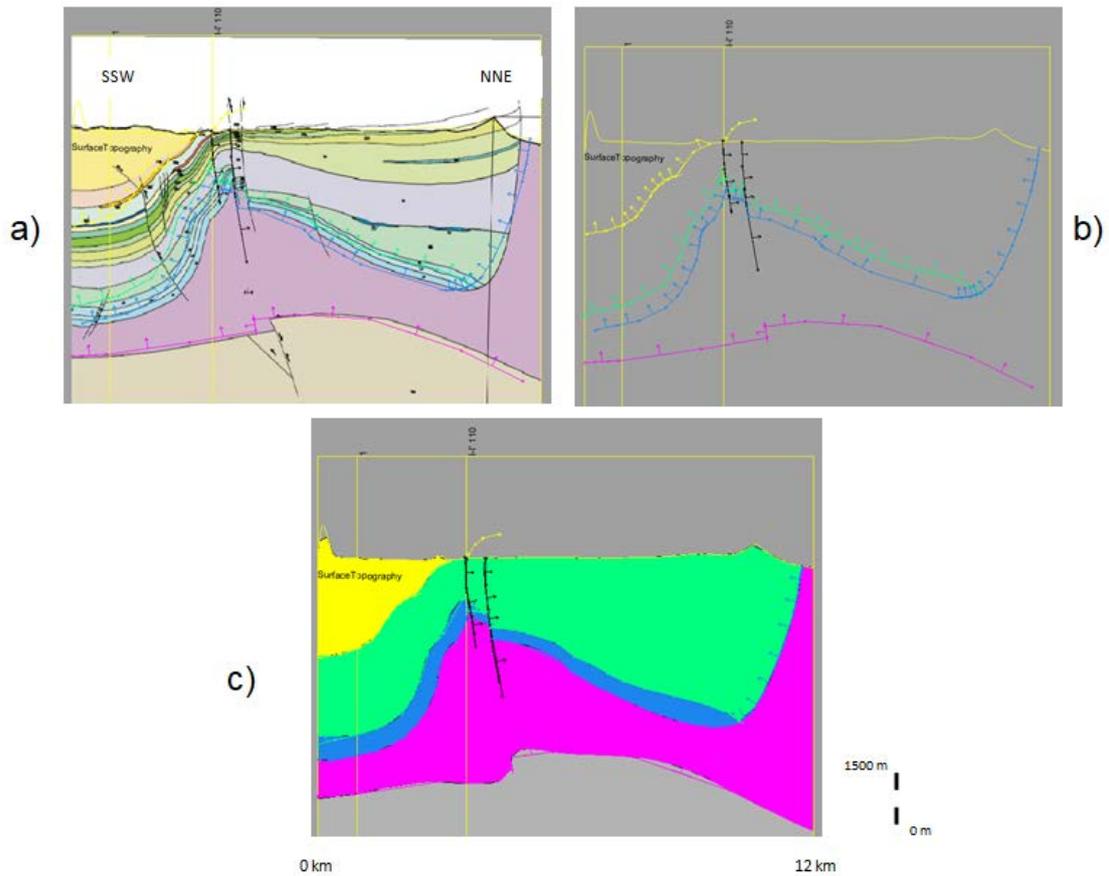


Figura 9 – Corte D-D': a) Corte geológico interpretado a partir de los estudios de sísmica de reflexión del proyecto *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*; b) Digitalización del corte geológico; c) Modelo 2D generado con *GeoModeller*. Encontramos el material del Keuper en rosa, el del Jurásico en azul, el del Cretácico en verde y el del Terciario en amarillo.

En la Figura 9 se puede observar como en la parte central el material salino se ha desplazado hacia cotas superiores siguiendo dos fallas normales (f41 y f42), aunque no llega a perforar los estratos superiores. En la zona N apreciamos una extrusión de este mismo material, correspondiente al diapiro de Villasana de Mena.

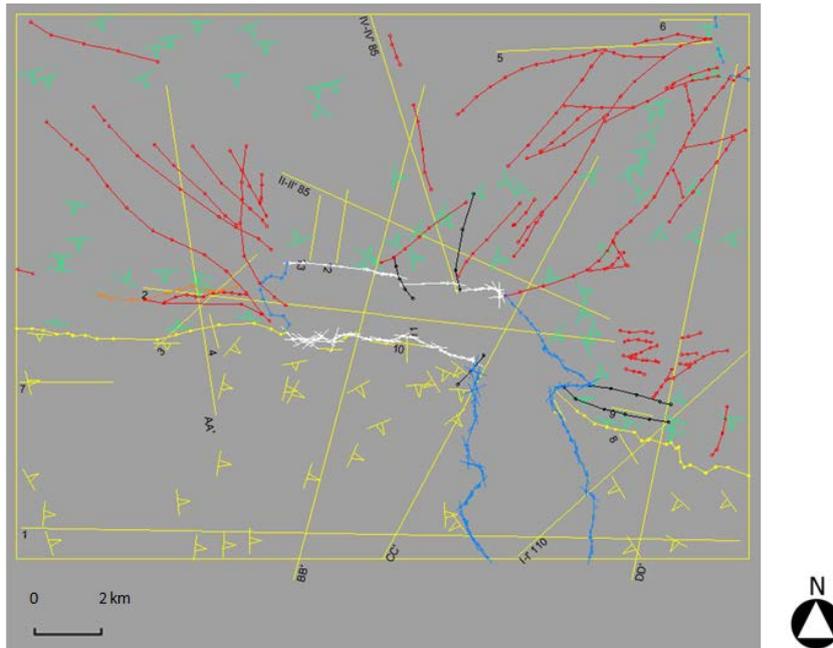


Figura 10 - Digitalización en superficie de los contactos (líneas azules delimitando el contacto Keuper-Jurásico y amarillas hacia la mitad de la cartografía en dirección E-O marcando el contacto Cretácico-Terciario), direcciones de capa, buzamientos y fallas (líneas rojas, blancas, negras y naranjas). Asimismo, aparecen identificadas en amarillo y con los nombres en negro, en los extremos de cada línea, las trazas de todos los cortes geológicos con su nomenclatura.

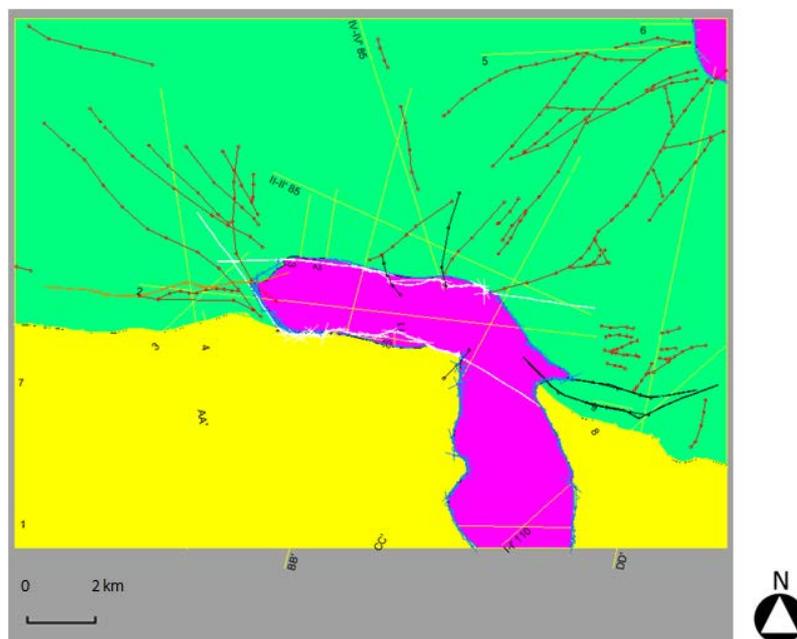


Figura 11 – Resultado de la modelización en el mapa de superficie. Se observa que los resultados coinciden con los límites geológicos digitalizados.

Tal y como se ha explicado anteriormente, en la digitalización de la cartografía geológica (Fig. 10) se puede observar cómo están todas las fallas existentes. Las de color rojo son todas las que no han aportado nada al modelo dada la división de materiales que se ha adoptado. Es por eso que en la *Figura 11*, a lado y lado de las fallas no modelizadas, los materiales son siempre los mismos y no se intuye ningún desplazamiento.

Los cuatro cortes están ordenados alfabéticamente según su situación, de occidental a oriental. En las *Figuras 6 y 9*, se puede observar que en las zonas más cercanas al límite de la zona de estudio, el material del Keuper ha sufrido un movimiento vertical siguiendo unas fallas, aunque no llega a haber perforación del material superior. Sin embargo en la zona central, se puede observar en los cortes B-B' y C-C' que el material extruye (Fig. 7 y Fig. 8), lo que es concordante con la cartografía. Asimismo en el último corte, el D-D', podemos observar como en la parte más septentrional sí que hay parte del material del Keuper que llega a la superficie. Esta extrusión corresponde al diapiro de Villasana de Mena (Fig. 9).

Los otros tres cortes geológicos que aportan información para este proyecto (II-II' 85, IV-IV' 85 y I-I' 110) no se presentan debido a la baja resolución a la que están hechos y a que no portan información relevante para esta memoria.

Discusión de los resultados

El modelo geológico 3D que hemos obtenido nos muestra un material salino que ha ascendido 4 km y sigue conectado a la base Hercínica. Esta masa ha perforado en el centro de la zona de estudio los materiales que se encuentran por encima de ella, siguiendo la orientación de dos cabalgamientos (*Diapir 1* y *Diapir 2*), de manera que aflora siguiendo una dirección Este-Oeste (Fig. 15).

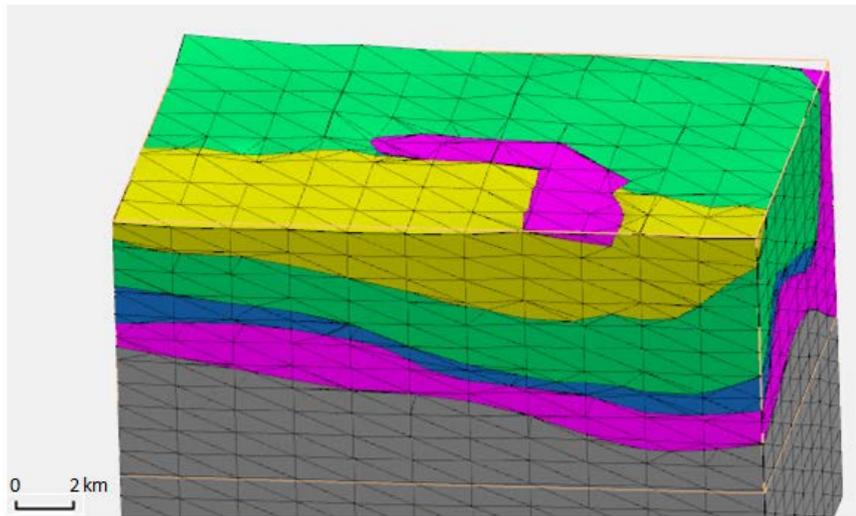


Figura 12 – Modelo tridimensional de la Zona de estudio

Podemos observar en la *Figura 12* cómo el material salino del Keuper ha experimentado un ascenso en la parte central que se traduce en el afloramiento del diapiro, así como en la zona NE, donde se encuentra el diapiro de Villasana de Mena. En las *Figuras 13, 14 y 15* se nos muestra la información sobre la extrusión del diapiro que se ha obtenido con la modelización 3D. No toda la zona en la que aflora el diapiro de Salinas de Rosío ha sido perforada, sino que en la parte más oriental de éste se ha vertido hacia el sur, recubriendo los materiales más modernos, por lo que en este tramo no está conectado en profundidad con el estrato salino.

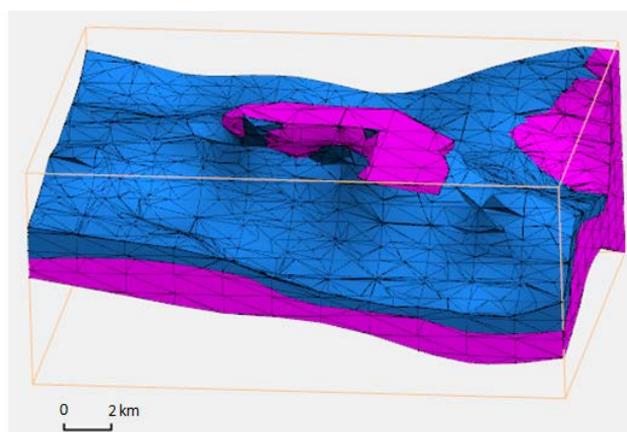


Figura 13 – Detalle del material salino del Keuper y del Jurásico (azul).

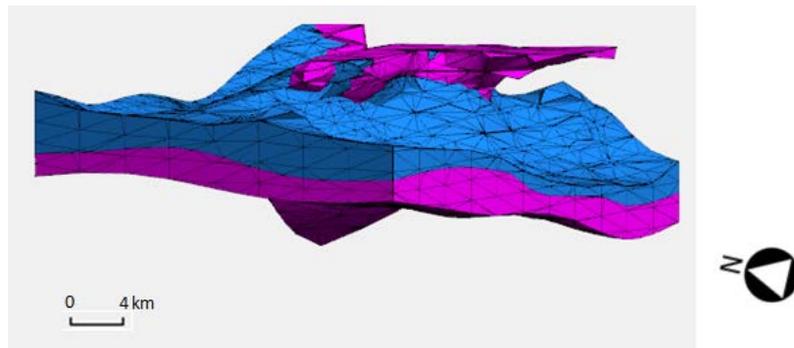


Figura 14 – Detalle del material salino del Keuper (rosa) y del Jurásico (azul) visto desde el SO.

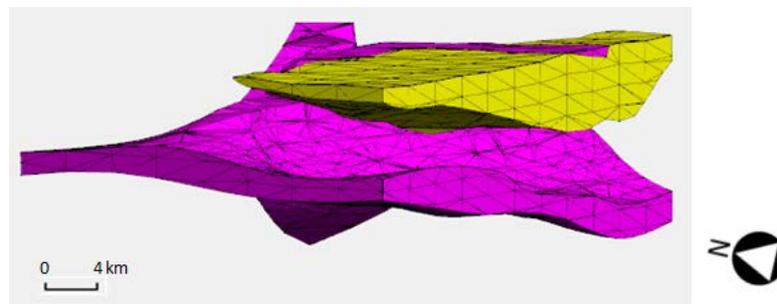


Figura 15 – Detalle del material salino del Keuper (rosa) y del Terciario (amarillo).

Gracias al modelo, podemos visualizar los materiales por separado y de esta manera obtener la imagen de la perforación. Para el estrato del Jurásico, de 750 m, la perforación es aproximadamente de 8 km de largo (en dirección E-W) por 2 km de ancho (N-S), recubriendo un área en el techo del material de unos 16 km² (Fig. 16).

En la capa del Jurásico que se muestra en la *Figura 16*, reside un estudio potencial para futuros proyectos de almacenamiento de gases. Conociendo valores de permeabilidad y la reactividad del material que conforma el estrato con las sustancias que se inyectarían, se podría valorar la rentabilidad de este proyecto.

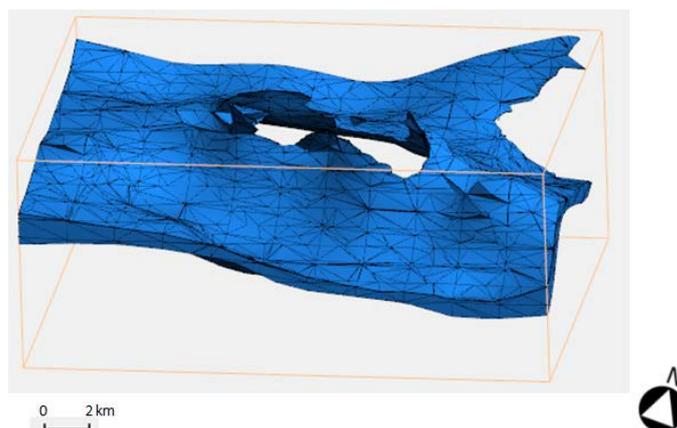


Figura 16 – Material del Jurásico.

Por otro lado, si solo tenemos en cuenta el diapiro y la función de sello de reservorio que podría realizar, el interés de esta zona estaría enfocado a la explotación de hidrocarburos. Para ello haría falta redefinir los materiales, subdividir en litologías específicas cada estrato para identificar la presencia de una roca madre y de un sustrato poroso. Sería necesario hacer un estudio más exhaustivo de la composición de los materiales de la zona de estudio.

Este proyecto se ha centrado en la modelización del diapiro, por tanto ha bastado una división por periodos de sedimentación de los materiales sin entrar en litologías específicas. De esta manera está limitado para el estudio de presencia de hidrocarburos.

Aun así, gracias a la imagen del estado final de la sal visualizamos un posible sello (Fig. 17), del que se puede acotar una zona que, en caso de cumplir los requisitos ya descritos, albergaría hidrocarburos. Ésta sería la zona próxima a la perforación producida por el diapiro.

La completa visualización del modelo 3D, se adjunta el *Anexo II*.

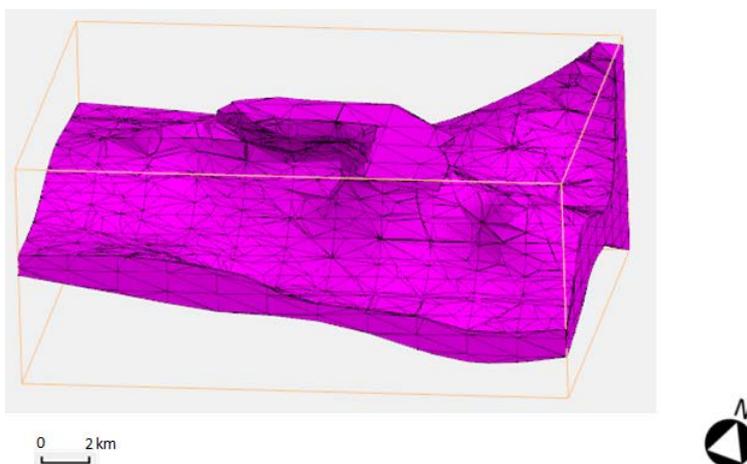


Figura 17 – Estado final de deformación del material salino del Keuper.

Referencias

Carreras Suárez, F., Del Olmo Zamora, P., Ramírez del Pozo, J., (1977). Mapa geológico de la Hoja nº 109 (Villarcayo). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Carreras Suárez, F., Martín Alafont, J M^a., Olaverri Capdevila, T., Ramírez del Pozo, J., (1977). Mapa geológico de la Hoja nº 110 (Medina de Pomar). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Del Olmo Zamora, P., Ramírez del Pozo, J., P. Aguilar Tomás, M. J., Portero García, J. M. y Olivé Davó, A. (1975). Mapa geológico de la Hoja nº 84 (Espinosa de los Monteros). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Del Olmo Zamora, P., Ramírez del Pozo, J., P. Aguilar Tomás, M. J., Portero García, J. M. y Olivé Davó, A. (1975). Mapa geológico de la Hoja nº 85 (Villasana de Mena). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Ministerio de Ciencia e Innovación, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto Geológico y Minero de España, 2010. *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂. Cuenca Cantábrica y Cuenca del Duero –Geología de Subsuelo-Estructura Ribero.*

Ortí, F. 2010. *Evaporitas: Introducción a la sedimentología evaporítica.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España, 717-748.

Perona, J. 2016. *Mineralizaciones de Zn-Pb asociadas a los diapiros de Murguía y Orduña (Cuenca Vasco-Cantábrica)* [en línea]. Capítulo 2. La Cuenca Vasco-Cantábrica [consulta: 22 de Octubre de 2018]. Disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/132089238.pdf>>.

Anexo I: Las fallas en el modelo

En este *Anexo II* se incluye toda la información referente a las fallas que afectan a la zona de estudio.

En la *Figura 18*, se encuentran las 51 fallas, tanto normales como cabalgamientos, que se han digitalizado

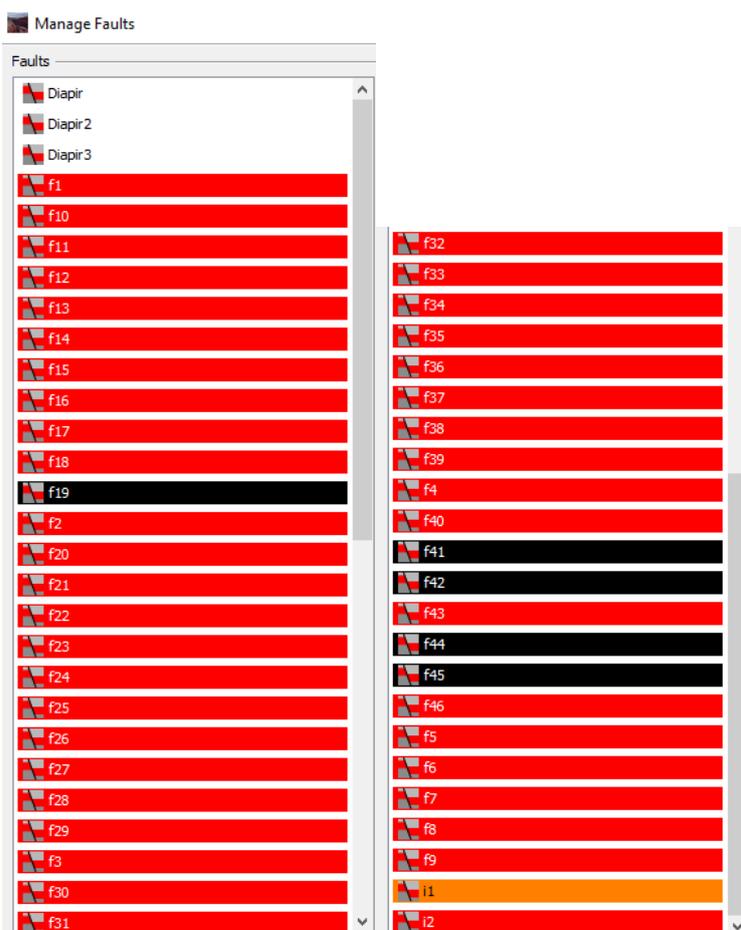


Figura 18 – Fallas digitalizadas en GeoModeller (más información en el texto).

Su nomenclatura responde a tres criterios:

- “Diapir” para los cabalgamientos que se encuentran en los límites del material perteneciente al Triásico Keuper.
- Añadiendo la letra “f” por delante de la numeración si se trata de fallas normales.
- Añadiendo la letra “i” si son cabalgamientos.

El color que se les ha asignado está en función de los materiales que cortan dichas fallas:

- Blancas las llamadas "Diapir".
- Negras las normales que cortan y afectan en la totalidad a una o más de las capas de materiales que tenemos definidos
- Naranjas los cabalgamientos que vayan a afectar nuestra geología
- Rojas el resto que no se tienen en cuenta en el modelo según la distinción litológica empleada.

De todas ellas sólo hemos utilizado en el modelo 8, y son las que afectan a dos o más litologías

Para cada falla hay que definir cómo se relacionan entre ellas (Fig. 19), así como a qué material o materiales afectan (Fig. 20):

The screenshot shows a dialog box titled "Link Faults with Faults". It contains two main sections. The top section is for fault f19, with "Stops on" set to f19 and f2. Below it is a table with rows for Diapir and Diapir2, and columns for f19 and f2. A green checkmark is in the cell for Diapir and f19. The bottom section is for fault f2, with "Stops on" set to f19 and f2. Below it is a table with rows for Diapir and Diapir2, and columns for f19 and f2. A green checkmark is in the cell for Diapir and f19. To the right of these sections is a larger table with columns for f42, f43, f44, and f45, and rows for Diapir, Diapir2, Diapir3, f1, f10, f11, and f12. Green checkmarks are present in the cells for (Diapir, f45), (Diapir2, f44), and (Diapir3, f45).

| Stops on | f42 | f43 | f44 | f45 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| Diapir | | | | ✓ |
| Diapir2 | | | ✓ | |
| Diapir3 | | | | ✓ |
| f1 | | | | |
| f10 | | | | |
| f11 | | | | |
| f12 | | | | |

Figura 19 - Secuencia de relación de las fallas entre sí.

The screenshot shows a dialog box titled "Link Faults with Series". It contains two main sections. The top section is for faults Diapir, Diapir2, and Diapir3. Below it is a table with columns for Diapir, Diapir2, and Diapir3, and rows for Terciario_Series, Cretacico_Series, Jurasico, and Keuper_Series. Green checkmarks are present in the cells for (Terciario_Series, Diapir), (Terciario_Series, Diapir2), (Cretacico_Series, Diapir), (Cretacico_Series, Diapir2), (Jurasico, Diapir), and (Jurasico, Diapir2). The bottom section is for fault f19. Below it is a table with a column for f19 and rows for Terciario_Series, Cretacico_Series, Jurasico, and Keuper_Series. Green checkmarks are present in the cells for (Terciario_Series, f19), (Cretacico_Series, f19), and (Jurasico, f19).

| Series | Diapir | Diapir2 | Diapir3 |
|------------------|--------|---------|---------|
| Terciario_Series | ✓ | ✓ | |
| Cretacico_Series | ✓ | ✓ | |
| Jurasico | ✓ | ✓ | |
| Keuper_Series | | | |

| Series | f19 |
|------------------|-----|
| Terciario_Series | ✓ |
| Cretacico_Series | ✓ |
| Jurasico | ✓ |
| Keuper_Series | |

| Series | Faults | f42 | f43 | f44 | f45 | i1 |
|------------------|--------|-----|-----|-----|-----|----|
| Terciario_Series | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Cretacico_Series | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Jurasico | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Keuper_Series | | | | | | ✓ |

Figura 20 - Relación entre los materiales y las fallas o cabalgamientos.

Anexo II: Modelo tridimensional del diapiro de Salinas de Rosío

En la siguiente página se encuentra adjunto el archivo con el modelo 3D del diapiro de Salinas de Rosío.



GeoModeller

