



**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN Exploración  
de hidrocarburos y recursos minerales**

**Curso 2023-2024**

**Caracterización de Materiales salinos como  
almacén-sello de Hidrógeno: Mioceno de la  
Cuenca de Madrid.**

**Characterization of Saline Materials as a  
Hydrogen storage-seal: Miocene of the Madrid  
Basin.**

**IASMYNA CRISTIANA STAN**

**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN Exploración  
de hidrocarburos y recursos minerales**

**Curso 2023-2024**

**Caracterización de materiales salinos como  
almacén-sello de Hidrógeno: Mioceno de la  
Cuenca de Madrid.**

**Characterization of Saline Materials as a  
Hydrogen storage-seal: Miocene of the Madrid  
Basin.**

**IASMYNA CRISTIANA STAN**

**TUTOR/ES DEL TRABAJO:**

**María Josefa Herrero Fernández**

**Fdo.:**

## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

NOMBRE APELLIDO APELLIDO (autor/a) Iasmyna Cristiana Stan

con NIE X8398513-Q, estudiante de Máster Exploración de Hidrocarburos y Recursos Minerales en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023 -2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Caracterización de Materiales salinos como almacén-sello de Hidrógeno: Mioceno de la Cuenca de Madrid y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: María Josefa Herrero Fernández

**DECLARO QUE:** El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 26 de Julio de 2024

Fdo.:

Iasmyna Cristiana Stan



## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo Fin de Máster. En primer lugar, a mi tutora, al Dra. María Josefa Herrero Fernández, por su constante apoyo, guía y paciencia a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y su dedicación ha sido una fuente de inspiración para mí.

En segundo lugar, me gustaría agradecerle a María José Varas por su inestimable ayuda en los ensayos petrofísicos, gracias a su dedicación y esfuerzo se han podido obtener resultados precisos y valiosos.

En tercer lugar, me gustaría agradecer a José Ignacio Escavy Fernández por su colaboración y asistencia durante el trabajo. Su disposición para ayudar y sus valiosos conocimientos y sugerencias han enriquecido enormemente este trabajo.

A mi familia, gracias por su amor y apoyo incondicional. Sus palabras de ánimo y su fe en mí han sido una fuente constante de fuerza y motivación.

Y por último me gustaría mencionar a esa persona especial que ha estado a mi lado, brindándome apoyo constante durante todo este proceso. Su comprensión y su paciencia, incluso en los momentos más difíciles, han sido un pilar fundamental para superar los desafíos y alcanzar este logro.

A todos ustedes, muchas gracias por su tiempo, sus enseñanzas y su apoyo incondicional. Este trabajo no habría sido posible sin su valiosa contribución.

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>1.1 Zona de estudio</b> .....	7
<b>1.2 Hidrógeno como recurso innovador</b> .....	9
<b>1.3 Posibles almacenes de hidrógeno</b> .....	11
<b>2. GEOLOGÍA</b> .....	13
<b>2.1 Contexto geológico</b> .....	13
<b>2.2 Estratigrafía de la Cuenca de Madrid</b> .....	14
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	18
<b>3.1. Trabajo de campo</b> .....	18
<b>3.2. Microscopía óptica</b> .....	18
<b>3.3 Petrofísica</b> .....	19
<b>3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)</b> .....	24
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	25
<b>4.1 Análisis de secciones de campo</b> .....	25
<b>4.2 Descripción láminas</b> .....	27
<b>4.3 Análisis petrofísico</b> .....	32
<b>4.3.1. Propagación ultrasónica de las ondas P y anisotropía</b> .....	32
<b>4.3.2 Ensayo de absorción por inmersión y desorción por evaporación del agua a presión atmosférica</b> .....	35
<b>4.3.3. Ensayo de saturación</b> .....	38
<b>4.3.4 Ensayo de permeabilidad al aire</b> .....	39
<b>4.4 Microscopio electrónico de barrido (SEM)</b> .....	40
<b>4.5 Discusión</b> .....	42
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	47
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	48

## **Resumen**

El almacenamiento de hidrógeno es crucial para la transición hacia energías sostenibles debido a sus beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, enfrenta desafíos relacionados con el desarrollo de métodos seguros y eficientes para su almacenamiento.

Las evaporitas, como halita, yeso y anhidrita, han surgido como opciones viables para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno debido a su baja permeabilidad, capacidad de autosellado y estabilidad. Este estudio explora la viabilidad del almacenamiento en formaciones de evaporitas, analizando aspectos como capacidad de almacenamiento o como sello. Se combinan técnicas geológicas y petrofísicas para proporcionar una comprensión integral de las ventajas y limitaciones del uso de evaporitas, además de identificar áreas de investigación futura para optimizar esta tecnología.

Alameda de la Sagra en Toledo, presenta formaciones geológicas de yesos que podrían ser adecuadas para el almacenamiento de hidrógeno. En esta zona se utilizó una combinación de análisis de columnas estratigráficas, petrofísicas, descripción de láminas delgadas y electrónica de barrido (SEM) para caracterizar las propiedades de las rocas. Se analizaron las características estructurales y sedimentológicas de los afloramientos y se realizan ensayos de propagación ultrasónica, absorción del agua, desorción y saturación para evaluar la capacidad de almacenamiento y flujo de fluidos en las formaciones geológicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de hidrógeno se ha convertido en una de las áreas más prometedoras para la transición hacia fuentes de energía sostenibles y limpias. El hidrógeno es un vector energético versátil y eficiente, capaz de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero cuando se utiliza como combustible (Crabtree *et al.*, 2004) ya que no emite gases de este tipo. Sin embargo, uno de los mayores desafíos asociados con la adopción generalizada del hidrógeno como energía es el desarrollo de métodos seguros, eficientes y económicos para su almacenamiento.

En este contexto, las evaporitas han emergido como una opción potencialmente viable para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno (Kruck & Crotogino, 2010). Las evaporitas son depósitos minerales formados como resultado de la evaporación de soluciones acuosas salinas, y comúnmente incluyen minerales como la halita (NaCl), el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Estas formaciones geológicas poseen características que las hacen atractivas para el almacenamiento de gases: su baja permeabilidad, su capacidad para autosellar fracturas y su estabilidad mecánica (Kruck & Crotogino, 2010)

Este estudio se enfoca en explorar la viabilidad del almacenamiento de hidrógeno en relación a formaciones de evaporitas, analizando aspectos clave como la capacidad de almacenamiento, la compatibilidad química del hidrógeno con los minerales presentes y las posibles vías de migración del gas. A través de una combinación de técnicas geológicas y petrofísicas, este trabajo pretende proporcionar una comprensión integral de las ventajas y limitaciones asociadas con el uso de evaporitas para el almacenamiento de hidrógeno o como sello, así como identificar áreas de investigación futura para optimizar esta tecnología y así contribuir con una solución de almacenamiento de hidrógeno segura y eficaz que contribuya a la infraestructura de energía sostenible del futuro.

### 1.1 Zona de estudio

El almacenamiento de energía juega un papel crucial en la transición hacia un futuro energético sostenible y descarbonizado. En este contexto, el hidrógeno se posiciona como

una alternativa prometedora para la generación limpia de energía y la descarbonización de sectores clave como el transporte y la industria (Bailera *et al.*, 2017). Una estrategia efectiva para aprovechar el potencial del hidrógeno es su almacenamiento seguro y eficiente en formaciones geológicas adecuadas (Tarkowski, 2019).

El municipio de Alameda de la Sagra, Toledo (Fig. 1A, B), ubicado en las coordenadas 40°00'21"N y 3°48'15"W, presenta formaciones geológicas de yesos (Fig. 2A, B) que podrían ofrecer condiciones favorables para el almacenamiento de hidrógeno. Estas formaciones no solo poseen propiedades estructurales y geológicas que podrían facilitar el almacenamiento seguro del hidrógeno, sino que podrían actuar como sello.

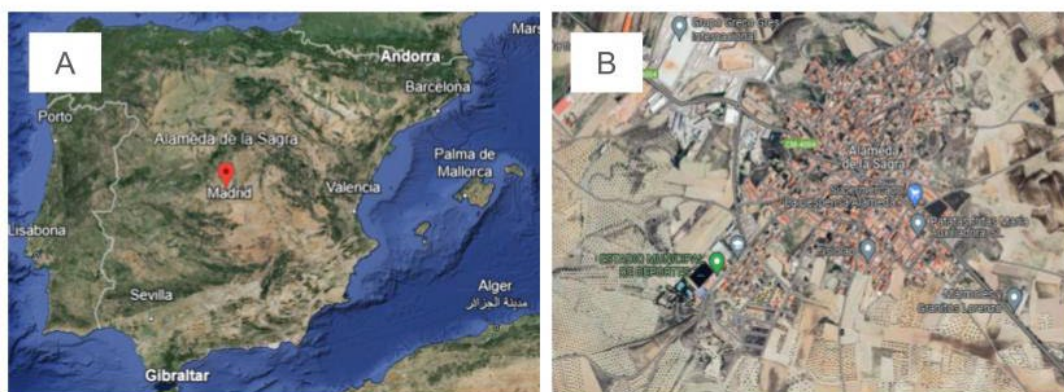


Figura 1. A) Localización de Alameda de la Sagra en la Península Ibérica. B) Población de Alameda de la Sagra, dentro de la provincia de Toledo, situada sobre materiales evaporíticos.

El desarrollo de un almacenamiento de hidrógeno en Alameda de la Sagra no solo podría contribuir significativamente a la transición energética regional y nacional, sino que también abriría nuevas oportunidades para la investigación y la innovación en tecnologías energéticas limpias. Este trabajo constituye un paso inicial hacia la evaluación integral de la viabilidad de esta iniciativa, con el objetivo último de promover un sistema energético más sostenible y resiliente para las generaciones futuras.



Figura 2. Fotografías de dos afloramientos de la formación estudiada: A) Sección correspondiente a la columna 1; B) sección de la columna 2.

## 1.2 Hidrógeno como recurso innovador

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo, representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. Es el elemento más ligero y el primero en la tabla periódica. En su forma molecular más común, se encuentra como gas diatómico ( $H_2$ ), que es incoloro, inodoro e insípido. Aunque es abundante en el universo, en la Tierra el hidrógeno molecular no se encuentra en forma libre en grandes cantidades, sino que está combinado con otros elementos, formando compuestos como el agua ( $H_2O$ ) y los hidrocarburos (Rigden, 2002).

El hidrógeno es considerado un recurso energético innovador debido a su capacidad de proporcionar una fuente de energía limpia, versátil y sostenible, Una de sus principales ventajas es la sostenibilidad y la reducción de emisiones (Mazloomi & Gomes, 2012). Cuando se utiliza en celdas de combustible, el hidrógeno produce sólo agua como subproducto, eliminando las emisiones directas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otros contaminantes atmosféricos asociados con los combustibles fósiles. Además, el hidrógeno puede ser producido mediante electrólisis del agua, un proceso que utiliza electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno (Mazloomi & Gomes, 2012). Si esta electricidad proviene de fuentes renovables como la solar o eólica, el hidrógeno resultante es completamente libre de carbono, siendo también conocido como “hidrógeno verde”. Este enfoque permite generar, almacenar y transportar energía renovable de manera eficiente, contribuyendo significativamente a la descarbonización de la economía global (Dincer, 2012). Puede ser producido localmente a partir de diversas fuentes (agua, biomasa, residuos) y tecnologías (electrolisis, reformado de gas natural), reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles importados y mejorando la seguridad energética de los países. (Ball and Weeda, 2015).

La versatilidad del hidrógeno se manifiesta en sus múltiples aplicaciones. Como generación de energía, el hidrógeno puede ser utilizado en celdas de combustible para la generación estacionaria de energía, proporcionando una fuente confiable y limpia de electricidad tanto para aplicaciones residenciales como industriales (Qusay *et al.*, 2023).

En el sector del transporte, el hidrógeno puede ser utilizado en vehículos de pila de combustible, ofreciendo tiempos de recarga rápidos y una autonomía comparable a la de los vehículos de combustión interna (Qusay *et al.*, 2023). Empresas automotrices como Toyota, Honda y Hyundai ya han lanzado modelos comerciales de vehículos de hidrógeno. Además, puede ser utilizado en turbinas de gas modificadas para generar electricidad a gran escala. El hidrógeno también actúa como un medio de almacenamiento de energía eficiente, resolviendo el problema de la intermitencia de las energías renovables. Por ejemplo, el exceso de electricidad generado por parques eólicos durante la noche puede ser utilizado para producir hidrógeno, que luego puede ser almacenado y utilizado cuando la demanda de electricidad es alta (Qusay *et al.*, 2023).

La seguridad energética es otra área donde el hidrógeno demuestra su potencial innovador. Además, el hidrógeno puede ser integrado en las infraestructuras de gas natural existentes con ciertas modificaciones, permitiendo su uso en una amplia gama de aplicaciones sin la necesidad de construir nuevas infraestructuras desde cero (Ball and Weeda, 2015).

Los avances tecnológicos y económicos en el campo del hidrógeno están impulsando también numerosas innovaciones, con métodos de producción de hidrógeno más económicos y técnicas avanzadas de almacenamiento, como el uso de materiales nanoporosos y aleaciones metálicas (Heinemann *et al.*, 2021). Este crecimiento en la industria del hidrógeno está creando nuevos mercados y oportunidades de negocio, desde la producción y distribución de hidrógeno hasta el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones basadas en hidrógeno, lo que se espera genere empleos y estimula el crecimiento económico en los sectores relacionados (Heinemann *et al.*, 2021). El impacto ambiental y social del hidrógeno también es significativo. El uso del hidrógeno verde también puede tener implicaciones en relación con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), ya que la reducción considerable de las emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyen a los objetivos internacionales de mitigación del cambio climático. La producción de hidrógeno a nivel local también puede empoderar a las comunidades rurales y remotas, proporcionando una fuente de energía limpia y accesible, y fomentando el desarrollo económico local (Staffell *et al.*, 2019)

### 1.3 Posibles almacenes de hidrógeno

El almacenamiento subterráneo de hidrógeno es una opción cada vez más explorada para gestionar grandes volúmenes de este gas y facilitar su uso como fuente de energía (Martínez del Olmo, 2021). Las formaciones geológicas adecuadas para este propósito incluyen cavernas de sal, formaciones de acuíferos profundos, reservorios agotados de hidrocarburos, formaciones de roca porosa y permeable, formaciones de roca fracturada y vetas de carbón no explotadas. A continuación, se realiza un análisis de los posibles materiales rocosos que pueden actuar como almacenamientos de hidrógeno evaluándose sus posibilidades en función de los riesgos que presentan:

1) Los acuíferos profundos son capas de roca porosa saturadas con agua a grandes profundidades. Estas formaciones pueden ser adecuadas para el almacenamiento de hidrógeno debido a su alta capacidad de almacenamiento y accesibilidad en diversas regiones geográficas. Sin embargo, la interacción química entre el hidrógeno y el agua presente en el acuífero, así como el control de la presión, son factores que requieren atención para asegurar una operación segura y eficiente (Tarkowski, 2019).

2) Los antiguos yacimientos de petróleo o gas que han sido explotados, conocidos como reservorios agotados, representan otra opción viable. Estos reservorios han demostrado su capacidad para contener gases a alta presión durante millones de años y a menudo ya cuentan con infraestructura de perforación y extracción. Sin embargo, pueden requerir rehabilitación y evaluación para garantizar la compatibilidad con el hidrógeno, así como para prevenir posibles fugas (Carden & Paterson, 1979).

3) Las formaciones de areniscas, calizas y dolomitas, que son rocas porosas y permeables, también pueden actuar como reservorios de gas. Su porosidad y permeabilidad facilitan el almacenamiento y la extracción de hidrógeno. Es crucial que estas formaciones estén cubiertas por unidades de rocas impermeables, como lutitas, para evitar fugas. La estabilidad y la interacción química con el hidrógeno deben ser cuidadosamente evaluadas para asegurar su viabilidad como almacenamiento a largo plazo (Heinemann *et al.*, 2021)

4) En algunos casos, las formaciones de roca dura (normalmente endógenas) con fracturas pueden ser utilizadas para el almacenamiento de hidrógeno. Estas formaciones están ampliamente distribuidas en muchas regiones y pueden proporcionar una opción adicional para el almacenamiento subterráneo, sin embargo, el control de la migración del gas a través de fracturas y la estabilidad geomecánica son factores críticos que deben ser gestionados adecuadamente (Panfilov, 2010).

5) Las vetas de carbón que no son económicamente viables para la minería también pueden ser consideradas para el almacenamiento de hidrógeno. El hidrógeno puede ser adsorbido en la superficie del carbón aprovechando la capacidad de adsorción natural del material. No obstante, la desorción controlada de hidrógeno y la estabilidad de la formación son áreas que requieren más investigación para asegurar un almacenamiento seguro y eficiente (Kus & Meyer, 2017).

6) Las cavernas de sal son una de las opciones más prometedoras para el almacenamiento de hidrógeno debido a varias características favorables: las sales tienen permeabilidad extremadamente baja, lo que evita fugas de gas, y la capacidad de las sales para fluir y sellar cualquier fractura mejora la seguridad del almacenamiento (Lord *et al.*, 2014). Además, la sal es química y físicamente estable con el hidrógeno. Las cavernas de sal (principalmente de halita) ya se han utilizado con éxito para almacenar otros gases como el gas natural y el gas de petróleo, lo que proporciona una base sólida de experiencia y conocimiento en su aplicación (Lord *et al.*, 2014).

Este trabajo se centra en la caracterización de los yesos (material salino) como medio para el almacenamiento y/o sello de hidrógeno. Se pretende evaluar las propiedades físicas y químicas del yeso para establecer su capacidad de almacenamiento o las posibilidades que presenta como roca que no permita su escape a superficie. Entre las propiedades de interés se incluyen la porosidad y la permeabilidad, así como la absorción del agua. El uso de yesos para el almacenamiento de hidrógeno podría ofrecer una alternativa económica y geológicamente viable, especialmente en áreas donde las formaciones de otras sales, como la halita, no están disponibles o son limitadas. Además, la explotación de yesos para este propósito podría contribuir a una mejor gestión de recursos y al desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes en el ámbito del almacenamiento de energía en España, donde cerca del 5-6 % de la superficie está representada por yesos de distintas edades (Escavy *et al.*, 2012).

Este estudio busca proporcionar una comprensión integral de las capacidades de los yesos para el almacenamiento de hidrógeno, utilizando técnicas avanzadas de caracterización. Los resultados obtenidos contribuirán a la expansión del conocimiento en esta área emergente y podrán informar futuras aplicaciones industriales y energéticas, apoyando la transición hacia una economía de energía limpia y renovable.

## 2. GEOLOGÍA

### 2.1 Contexto geológico

La Cuenca de Madrid se sitúa en una cuenca intraplaca en la Península Ibérica, formada como resultado de procesos tectónicos durante la orogenia alpina. Su evolución estructural comenzó con las compresiones alpinas que afectaron el Macizo Hespérico durante el Eoceno-Oligoceno, contribuyendo significativamente a la individualización del Sistema Central (García del Cura *et al.*, 1986). Estos eventos tectónicos fueron fundamentales para la configuración inicial de la cuenca, marcando el inicio de su desarrollo como una depresión sedimentaria en el contexto de un contexto de deformación regional intensa (Mediavilla López *et al.*, 2001).

Durante el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, la Sierra de Altomira emergió como una estructura tectónica clave en la evolución de la cuenca. Este relieve se formó como un gran cabalgamiento que separó la Cuenca de Madrid propiamente dicha, situada al oeste de la sierra, de la Depresión Intermedia o Cuenca de Loranca al este (García del Cura *et al.*, 1986). Esta configuración facilitó una clara diferenciación entre las áreas de sedimentación lacustre y aluvial en ambas cuencas, con la Cuenca de Madrid predominantemente orientada hacia el oeste y la Depresión Intermedia hacia el este, funcionando como una cuenca "piggy-back" (García del Cura *et al.*, 1986).

La evolución subsiguiente de la Cuenca de Madrid durante el Neógeno estuvo controlada por el movimiento de fracturas verticales a inversas que definieron los bordes de la cuenca, excepto en la zona de la Sierra de Altomira, donde la estructura cabalgante introdujo complicaciones adicionales (García del Cura *et al.*, 1986). Este régimen tectónico no uniforme condujo a variaciones significativas en la extensión vertical y la geometría de los depósitos sedimentarios a lo largo de los márgenes de la cuenca, afectando directamente la configuración de los sistemas aluviales y lacustres (García del Cura *et al.*, 1986).

Los márgenes de la Cuenca de Madrid exhiben una notable heterogeneidad, reflejo de la complejidad de su historia geológico-tectónica. Estos márgenes incluyen segmentos del orógeno Hercínico reactivados durante el ciclo alpino, como el Sistema Central y los Montes de Toledo, que han actuado como zonas de aporte sedimentario significativo hacia la cuenca. Además, la presencia de cadenas alpinas con formaciones mesozoicas y paleógenas, como la Cordillera Ibérica en su rama castellana, añade una diversidad litológica crucial a las áreas fuente de sedimentos (Mediavilla López *et al.*, 2001).

## 2.2 Estratigrafía de la Cuenca de Madrid

Las unidades del Mioceno en la Cuenca de Madrid muestran una notable variabilidad en sus asociaciones de facies, reflejando diferentes condiciones ambientales a lo largo del tiempo geológico. Esta diversidad se manifiesta claramente en la variación entre las unidades estratigráficas, permitiendo una descripción detallada e interpretación individual de cada una de ellas (Calvo *et al.*, 1989). Los materiales a analizar forman parte de la parte superior de la Unidad Inferior y la parte más baja de la Unidad Intermedia del Mioceno de la Cuenca de Madrid.

Los materiales que pertenecen a la Unidad Inferior, de edad Miocena, también conocida como Unidad Salina, se caracterizan por una compleja sucesión de facies compuestas por evaporíticas, lutitas y margas que representan facies de ambientes lacustres endorreicos (García del Cura *et al.*, 1986). Predominan la anhidrita que se transforma en yeso en los afloramientos superficiales, junto con halita y carbonatos como magnesita y dolomita (Mediavilla López *et al.*, 2001). Estos materiales se presentan en conjuntos rítmicos con capas de carbonatos y lutitas de aproximadamente  $3,2 \pm 0,3$  mm de grosor, alternando con capas de evaporitas de hasta  $4,3 \pm 0,3$  mm de espesor. Estas secuencias frecuentemente muestran alteraciones producidas por recristalizaciones diagenéticas (nodulizaciones) y deformaciones mecánicas, fenómenos comunes en ambientes deposicionales de naturaleza evaporítica (García del Cura *et al.*, 1986).

El relleno de la cuenca presenta una disposición centrípeta de facies típica de una cuenca lacustre endorreica: en el borde de cuenca se encuentran depósitos clásticos que van variando a depósitos lutíticos con intercalaciones de yeso/anhidrita en nódulos (Mediavilla López, *et al.*, 2001). Estas facies, en cotas por debajo de la cota actual de 480 m, presentan un cambio lateral de facies hacia el centro de la cuenca a sedimentos rítmicos milimétricos de polihalita-halita con un espesor centimétrico, caracterizado por halita "limpia" con escasas inclusiones, lo cual es indicativo de sedimentación subacuática (García del Cura *et al.*, 1986). Además de las características sedimentarias, la Unidad Salina alberga depósitos de sales sódicas de interés económico como la glauberita y la thenardita (Fig. 3), explotadas en minas tanto a cielo abierto como subterráneas en las partes centrales de la cuenca. (García del Cura *et al.*, 1986).

Los procesos telodiagenéticos han jugado un papel crucial en la evolución de los materiales de la Unidad Salina, homogeneizando sus afloramientos naturales. Estos aparecen principalmente como facies yesíferas meso-macrocrystalinas que, solo bajo microscopio

petrográfico, revelan los minerales salinos de los que derivan, como la anhidrita y, en menor medida, la glauberita (Herrero et al., 2015).

A techo de esta unidad se encuentra la Unidad Intermedia (Fig. 3), la cual muestra notables diferencias respecto a la unidad subyacente, especialmente por la ausencia de facies salinas mencionadas anteriormente (Mediavilla López, *et al.* 2001). En su lugar, esta unidad está dominada por asociaciones de facies lacustres que incluyen carbonatos como calcita y dolomita, así como yeso. La arquitectura de estos sistemas deposicionales muestra anillos bien desarrollados de facies aluviales que se vuelven progresivamente más finos hacia el centro de la cuenca (Calvo *et al.*, 1989).

Desde una perspectiva tectonosedimentaria, la Unidad Intermedia puede subdividirse en dos secciones distintas separadas por una ruptura marcada por una progradación relativa de los sistemas aluviales de borde de cuenca. Esta ruptura, que se produce durante el Aragoniense superior, es claramente discernible en la parte occidental de la cuenca (por ejemplo, en Paracuellos de Jarama, cerca de Madrid) y en toda su parte noreste. (Calvo *et al.*, 1986). La parte inferior de la Unidad Intermedia está interpretada como un sistema de llanura con depósitos de lutitas y lagos salinos, los cuales se caracterizan por ser relativamente poco concentrados, se encuentra en contacto directo o progresivo una unidad compuesta por capas estratificadas de yesos primarios y carbonatos de color crema, margas y lutitas, con un espesor máximo de 55 metros (Calvo *et al.*, 1986). La parte superior de la Unidad Intermedia se caracteriza por un amplio desarrollo de sistemas lacustres dominados por carbonatos de agua dulce, que alcanzan hasta 75 m de espesor en las zonas septentrionales de la cuenca, indicando una máxima expansión de los sistemas lacustres coincidente con la amortiguación de los relieves circundantes (Mediavilla López *et al.*, 2001).

Por último, el relleno Mioceno se completa con la Unidad Superior, compuesta de sedimentos más finos con un espesor que varía entre 0 y 50 m, donde se observan un nivel inferior que es predominantemente clástico y también un nivel superior formado por carbonatos (Fig. 3). Esta unidad se dispone erosivamente sobre la Unidad Intermedia (García del Cura *et al.*, 1986). El reconocimiento de esta unidad permite en numerosos afloramientos localizar la situación de las unidades subyacentes.

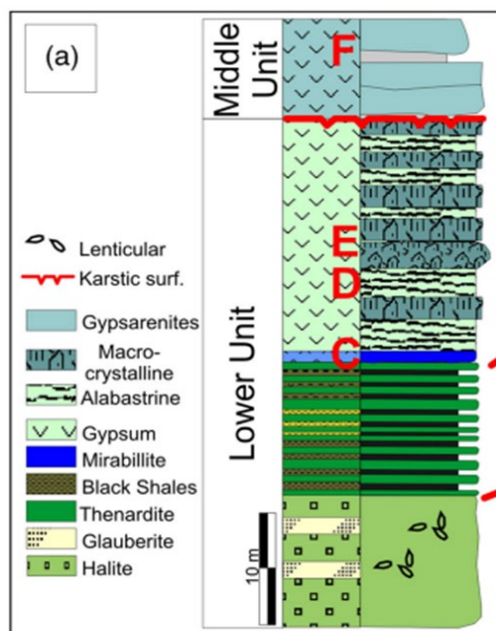


Figura 3. Sección estratigráfica de la parte superior de la Unidad Inferior y la parte más baja de la Unidad Media del Mioceno en la cuenca del Tajo (Herrero et al., 2015)

Este estudio se basa en el análisis de los materiales que conforman las facies del centro de cuenca de límite de las unidades Inferior e Intermedia. En esta zona, la investigación dirigida hacia sales sódicas de interés económico, como la glauberita y la thenardita, ha proporcionado valiosos datos en la zona de Colmenar de Oreja, con testigos continuos de hasta 260 metros, así como en las minas "El Castellar" y "Consuelo" (García del Cura et al., 1986). A partir de la observación de testigos de sondeo, se han distinguido las dos unidades en función de determinadas características: 1) la Subunidad Inferior está caracterizada por evaporitas laminadas, principalmente anhidrita, alternando con magnesita criptocrystalina y lutitas ricas en materia orgánica (García del Cura et al., 1986). En ocasiones, en lugar de anhidrita, aparecen glauberita, polihalita y/o halita, con términos salinos más gruesos. Por encima, en torno a la cota actual de 550 metros, se encuentra la Subunidad Superior, separada de la anterior por un tramo de arcillas rojas con halita, donde además de glauberita idiomorfa, magnesita margosa y lutitas magnesíticas, aparece thenardita, con un espesor que puede alcanzar los 7 metros (Calvo et al., 1989).

La textura de las facies halíticas, con abundante halita "limpia" (pobre en inclusiones), especialmente en las facies polihalíticas, y las características granulométricas y estructurales de las lutitas subyacentes, así como el carácter laminar de muchas facies polihalíticas y anhidríticas, indican su origen bajo lámina de agua, lo que sugiere la existencia de un lago perenne (Calvo et al., 1989). La presencia de thenardita y la mayor abundancia de detritos en la parte alta de la Unidad Inferior implican un cambio en las condiciones de sedimentación en

comparación con la parte baja de la Unidad Inferior, sugiriendo que grandes áreas de la cuenca se expusieron y, debido a la lixiviación, generaron salmueras que precipitaron thenardita o mirabilita (García del Cura *et al.* 1986; Herrero *et al.*, 2015).

Los datos isotópicos sugieren que los aniones de las sales en la Cuenca de Madrid provienen de sedimentos salinos más antiguos, mientras que la composición catiónica, especialmente Na y K, podría estar influenciada por áreas fuentes graníticas y metamórficas a través de aguas de lixiviación (García del Cura *et al.*, 1986). El sistema deposicional corresponde a un lago salino con dirección predominante norte-sur, cuyo eje de máxima profundidad se situaba paralelo a la Sierra de Altomira y cuyo depocentro estaba en el meridiano de Madrid. Este lago salino presentaba un borde tectónicamente activo al este y un borde occidental menos activo, con depósitos de llanuras lutíticas evaporíticas y facies de anhidrita nodular y/o enterolítica. La sucesión salina en este margen muestra una tendencia expansiva de las facies evaporíticas sobre las facies de borde. El análisis de facies en partes más centrales de la cuenca sugiere una ritmicidad climática, con depósitos carbonáticos en periodos húmedos y depósitos de anhidrita y/o glauberita y/o halita en periodos secos (Mediavilla López *et al.*, 2001)

La formación de sistemas lacustres cenozoicos en España fue principalmente controlada por la actividad tectónica de la microplaca Ibérica y cambios paleográficos y paleoclimáticos en el mediterráneo occidental y el Atlántico oriental. La Unidad Inferior del Mioceno en la Cuenca del Tajo, que data del límite Oligoceno-Mioceno (23 Ma) el Burdigaliense (16 Ma), es de particular interés debido a la variación en temperatura y humedad que ocurrieron durante este periodo (Herrero *et al.*, 2015).

Estudios paleoclimáticos basados en asociaciones de mamíferos sugieren que este periodo fue inicialmente cálido y húmedo, volviéndose más árido al final. La presencia de la thenardita en esta secuencia se correlaciona con una etapa más fría y árida (Herrero *et al.* 2015). La secuencia de la Unidad Inferior muestra cambios faunísticos hacia condiciones más frías y áridas (18.4 Ma), coincidiendo con eventos glaciares globales. Los depósitos lacustres de la parte superior de la Unidad Inferior de la sucesión del Mioceno del Tajo se formaron durante un período donde la temperatura estaba sujeta a una disminución significativa y la aridez se convirtió en un factor clave (alrededor de los 18,4 Ma), las salmueras se concentraron mediante un mecanismo de enfriamiento-congelación que llevó a la formación de capas gruesas y bien diferenciadas de mirabilita, que luego se transformaron diagenéticamente en thenardita (Herrero *et al.*, 2015).

### 3. METODOLOGÍA

En el presente estudio se ha adoptado una metodología integral que combina técnicas de análisis de columnas estratigráficas, petrofísicas, la descripción de láminas delgadas, y el uso de la microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar en detalle las propiedades de las rocas. Esta metodología permite obtener una comprensión profunda y multifacética de las características físicas y químicas de los materiales geológicos estudiados.

**3.1. Trabajo de campo:** Este análisis se centra en la identificación de las características estructurales y sedimentológicas presentes en los afloramientos. Se han analizado y medido columnas estratigráficas en varias canteras de la zona donde pueden observarse los materiales de las unidades Inferior e Intermedia y su contacto. Se han establecido las facies sedimentarias presentes, las litologías y las superficies internas presentes, así como estructuras tectónicas y relaciones estratigráficas, las cuales proporcionan información esencial sobre los procesos geológicos y el ambiente deposicional que han dado forma a la región estudiada. Con este análisis se ha podido determinar las características de la sucesión estratigráfica y se ha procedido al muestreo de los materiales que presentan un mayor interés para el estudio.

**3.2. Microscopía óptica:** Esta técnica permite la observación microscópica de la textura, mineralogía y estructura interna de las rocas. Mediante la descripción detallada de las láminas delgadas, es posible identificar y clasificar los diferentes minerales presentes, así como interpretar los procesos diagenéticos que han afectado a las rocas a lo largo del tiempo geológico y establecer su organización en el tiempo (evolución diagenética).

El primer paso para la elaboración de las láminas delgadas es realizar el corte de la roca, mediante una máquina radial diamantada, por la zona de interés de la muestra de roca previamente recogida en el campo. En el laboratorio, una de las dos mitades que no se va a emplear para la elaboración de la lámina, se numera y almacena, para que, en caso de que surja algún problema, exista un registro de la muestra y se pueda volver a hacer otra lámina delgada.

El siguiente paso es el pulido de la cara de interés del taco para corregir las posibles imperfecciones que puedan haber quedado tras el corte. Para ello se utiliza carburo de silicio o carborundo, un compuesto casi tan duro como el diamante que se utiliza como abrasivo y que permite ir lijando progresivamente la cara del taco desde granos más gruesos a más finos. Cuando ha quedado perfectamente pulida la cara lisa del taco, se deja en una plancha de

secado durante unos 15 minutos a 70°C para eliminar los posibles restos de agua que hayan quedado en los poros de la muestra.

Una vez se ha secado la muestra se procede al pegado del cristal de la lámina sobre el taco utilizando un pegamento termoplástico o epóxico. Es importante evitar que se formen burbujas entre el cristal y la muestra, para lo cual se mueve el cristal ligeramente durante el pegado. Además, para evitar que suba el pegamento mientras está fraguando, se coloca en una prensa durante 45 minutos.

Cuando el pegamento ha fraguado y el cristal está bien pegado al taco, se vuelve a cortar la muestra, en esta ocasión por el otro lado. Este proceso se realiza en una máquina de desgastado, mediante la cual se consigue reducir el espesor del taco a unas 200  $\mu\text{m}$ .

A partir de la referencia de los colores de interferencia del mineral más duro, generalmente cuarzo, se vuelve a utilizar el carborundo para ir reduciendo el espesor de la muestra hasta que los minerales adquieran los colores de interferencia que les corresponde en la vista al microscopio. En el caso de estas muestras, al tratarse de evaporitas, este último paso presenta cierta complejidad ya que se pueden disolver muy fácilmente y, no se puede utilizar el cuarzo como mineral de referencia, sino que hay que fijarse en los minerales de interés para obtener el grosor indicado. Al ser unas muestras complicadas se usa la máquina de pulido, ya que esta ofrece más precisión que realizarlo a mano. Para pulir las láminas se usa aceite o se pulen en seco y que estas en contacto con el agua se pueden disolver o afectar la composición de los minerales.

Finalmente, cuando la muestra está lista se le coloca la etiqueta con el nombre.

**3.3 Petrofísica:** La primera etapa del análisis involucra la caracterización petrofísica, que incluye la medición de propiedades intrínsecas de las muestras de roca, tales como las propiedades estructurales (compacidad, permeabilidad al aire, anisotropía, propagación ultrasónica, porosidad/es y densidad/es) y las hídricas (absorción, desorción y saturación). Estas propiedades son fundamentales para evaluar la capacidad de almacenamiento y flujo de fluidos en formaciones geológicas, siendo esenciales para aplicaciones en la exploración y producción de hidrocarburos, así como en la evaluación de reservorios de agua subterránea. Para este estudio se han usado diferentes normas UNE-EN, NORMAL, RILEM, etc, que definen las siguientes técnicas y ensayos realizados:

### -Propagación ultrasónica

Esta técnica se utiliza para medir el tiempo que tarda una onda longitudinal para en atravesar un material de espesor conocido. Con esta información, se puede determinar la velocidad de propagación ultrasónica de las ondas P ( $V_p$ ). Esta velocidad está influenciada por diversas características del material como su densidad, porosidad, mineralogía, textura y grado de anisotropía, así como por su contenido de agua y otros fluidos (Fort *et al.*, 2011). Para realizar este análisis se ha seguido lo estipulado en la UNE-EN 14579:2005. El equipo utilizado para realizar la medición ha sido el Pundit Lab+ con transductores de 250 kHz y 2,8 cm de diámetro (Fig. 4).

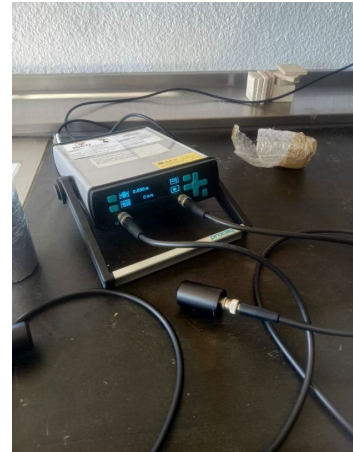


Figura 4. Equipo de propagación ultrasónica PUNDIT

Para poder realizar este ensayo hay que preparar la muestra minuciosamente, hay que cortar la muestra a dimensiones adecuadas y hay que medir el tamaño de la misma. Lo ideal es que la muestra tenga forma de cubo para que las ondas puedan pasar fácilmente de un lado al otro y las mediciones en varios sentidos sean lo más homogéneas posibles; se deben evitar las superficies rugosas, se necesitan unas superficies lisas y planas para que el transductor se pueda pegar a la muestra, para lo que se ha usado plastilina. Una vez colocado el transductor se emite una onda ultrasónica y se registra el tiempo que tarda en atravesar la muestra. Las mediciones se deben repetir varias veces para obtener un promedio y asegurar precisión (al menos tres mediciones para que sea suficientemente representativo).

Con los valores de  $V_p$  medidos en las tres direcciones del espacio se calculan los índices de la anisotropía total ( $dM\%$ ) y relativa ( $dm\%$ ). Ambos índices ofrecen información complementaria, ya que cada uno de ellos indica en qué dirección espacial está concentrada la orientación estructural, textural y/o mineralógica que condiciona su anisotropía y que puede suponer una dirección de debilidad que puede ser aprovechada por los fluidos en su desplazamiento (Fort *et al.*, 2008). Los índices de anisotropía que se determinan son los siguientes (Guyader and Dennis 1986; Fort *et al.*, 2011)

$$dM = \left[ 1 - \left( \frac{2V_{pmin}}{(V_{pmed} + V_{pmax})} \right) \right] \times 100$$

$$dm = \left[ 2 \times \frac{(Vpmax - Vpmed)}{(Vpmax + Vpmed)} \right] \times 100$$

Donde:

dM = Anisotropía total (%)

dm = Anisotropía relativa (%)

Vp min/med/max = Valores mínimo, medio y máximo respectivamente de velocidad de propagación de las ondas P (m/s) en los tres ejes espaciales.

-Absorción de agua por inmersión a presión atmosférica (ABS).

Esta técnica se ha empleado siguiendo la norma UNE-EN 13755:2008 y NORMAL 7/81 para piedra natural. Se sigue la norma italiana NORMA 7/81 para el ensayo cinético de absorción de agua, donde las muestras de piedra, secas y con peso constante (Md), se sumergen completamente en agua (t0=se sumerge la mitad de la muestra; t0+1 hora=3/4 de la muestra y la t0+2h= completa más 2,5 cm por encima del agua), y posteriormente, según determinados tiempos, las muestras se sacan y se pesan (Fig. 5). Al finalizar el ensayo se dibuja la curva cinética de absorción (agua absorbida (%) frente tiempo ( $s^{1/2}$ )) con los pesos ganados (%) y la raíz cuadrada de los tiempos en segundos hasta 169 horas (7 días). Posteriormente se determina el Coeficiente de Absorción (Abs %, UNE-EN 13755: 2008) de agua al cabo de 48 horas.

Md= Peso seco inicial (g)

Ms= Peso saturado a distintos t(g)

$$Abs = \left[ \frac{(Ms - Md)}{Md} \right] \times 100$$

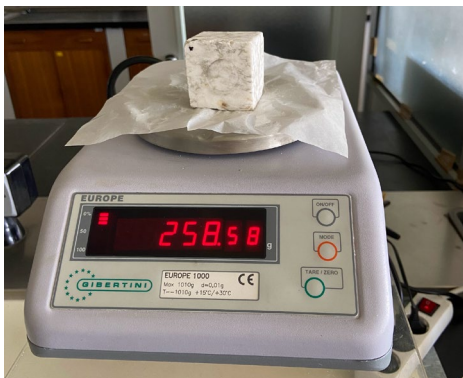


Figura 5. Pesada de la Muestra AL16.

### -Desorción del agua por evaporación a presión atmosférica

Con esta técnica se determina la cinética de desorción de agua por parte de las muestras estudiadas. La metodología es similar al ensayo de absorción de agua por inmersión a presión atmosférica, y los valores se representan en la misma gráfica obtenida.

Este ensayo sigue la norma italiana NORMAL 7/81, que determina cómo una roca pierde el agua con el tiempo (pudiendo obtenerse el momento donde pierde más agua o donde deja de perder o la rapidez con que lo hace). Partiendo de las muestras saturadas ( $M_s$  a 169h) del ensayo de cinética de absorción previamente efectuado, las mismas muestras se depositan sobre una rejilla a condiciones atmosféricas estándar ( $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) y se van pesando a determinados tiempos hasta alcanzar, como en el ensayo anterior, las 169 horas (7 días). Se estudia la cantidad y la velocidad de pérdida de peso por la evaporación del agua de la muestra.

Para calcular la desorción se usa la misma fórmula que para la absorción, teniendo como objetivo que el último valor se acerque lo más posible a la pesada inicial, con la posibilidad de que pierda toda el agua absorbida (esto representará la cantidad de porosidad abierta). En el caso en el que no sea así se confirmará que hay porosidad atrapada en el interior de la muestra, que retiene parte del agua absorbida.

### -Saturación: Densidades real y aparente, y porosidades abierta y total

Este ensayo hídrico permite determinar los parámetros densidad real y aparente y la porosidad abierta, atrapada y total, la saturación y la compacidad (UNE-EN 1936: 2007). Las probetas, previamente secas y con peso constante ( $M_d$ ) son sumergidas, dejándolas 169h (7 días) bajo inmersión total. Después de una semana sumergidas y coincidiendo con el final del ensayo de absorción (169 horas), se pesarán las probetas, primero con la balanza hidrostática ( $M_h$ ) y luego con la balanza normal ( $M_s$ ). Con estas tres pesadas se determinan los siguientes parámetros a través de una serie de fórmulas:

$$D_r = \frac{M_d}{(M_d - M_h)} \quad (\text{según RILEM, 1980})$$

$$D_a = \frac{M_d}{(M_s - M_h)} \times \rho_{\text{agua. } 20^{\circ}\text{C}} \quad C = \frac{D_a}{D_r}$$

$$Pa = \left[ \frac{(Ms - Md)}{(Ms - Mh)} \right] \times 100 \quad Pt = \left[ 1 - \left( \frac{Da}{Dr} \right) \right] \times 100$$

$$Pr = Pt - Pa \quad Sat = \left[ \frac{(Ms - Md)}{Md} \right] \times 100$$

Donde:

Md = Peso seco (g)

Ms = Peso saturado/húmedo (g)

Mh = Peso hidrostático (g)

Dr = Densidad real (kg/m<sup>3</sup>)

Da = Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)

Pa = Porosidad abierta o accesible al agua (%)

Pt = Porosidad total (%)

Pr = Porosidad atrapada o retenida (%)

Sat = Saturación de agua (%)

C = Índice de compacidad (1-0)

$\rho$  agua a 20°C = 0,998 g/cm<sup>3</sup>

### -Permeabilidad al aire

Esta técnica determina la facilidad con la que el aire puede circular por el interior de la muestra (Gómez-Marfil and Varas-Muriel, 2023). Para poder realizar esto se introduce aire a presión en las muestras cúbicas con el equipo de medición PTN45LPF (Fig. 6.). Las medidas se realizan en un rango de 10 mD a 10 D, siendo D: Darcy. Para calcular la permeabilidad de las muestras se usó la siguiente fórmula:

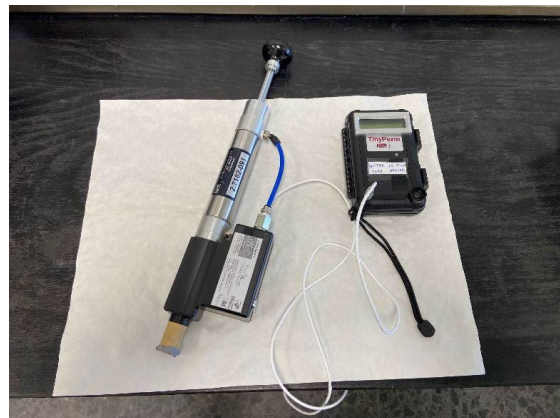


Figura 6. Equipo de medición de permeabilidad Tiny Perm II.

$$T = -0,8206 \cdot \log_{10}(K) + 12,8737$$

T: Valor obtenido por el equipo

K: Permeabilidad en mD (miliDarcy)

**3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** Finalmente, se utiliza la microscopía electrónica de barrido para obtener imágenes de alta resolución y realizar análisis químicos cualitativos y cuantitativos de las muestras utilizando el equipo JDM-IT700HR (Fig. 7). El SEM proporciona información detallada sobre la morfología de los poros, la distribución de minerales y la composición elemental de las rocas. Además, la capacidad del SEM para realizar microanálisis por dispersión de energía de rayos X (EDS) permite la identificación precisa de los elementos presentes en las muestras.

La técnica implica bombardear la muestra con un haz de electrones en una cámara en vacío. Para preparar la muestra para que sea conductora es necesario recubrir en oro: primero se coloca la muestra sobre una cinta de carbón en una lámina de latón, y luego se introduce en una máquina que la recubre con una película fina de oro. De este modo, los electrones no se concentran en la superficie de la muestra y la atraviesan.



*Figura 7. SEM en el Centro de Microscopía electrónica de la UCM, equipo JDM-IT700HR.*

Es importante distinguir los diferentes tipos de información que se puede obtener; se pueden obtener datos de Electrones Secundarios (SE) que aportan un buen conocimiento de la morfología y la superficie de los minerales, Electrones Retrodispersivos (BSE) que se utilizan para identificar la presencia de minerales pesados, y datos de Rayos X (EDX) que permite realizar un análisis químico de los elementos presentes en la muestra.

La combinación de los resultados de todas estas técnicas proporciona la caracterización de las propiedades petrofísicas y características físico-químicas de las rocas, permitiendo correlacionar datos petrofísicos con observaciones microestructurales y composicionales. Este enfoque multidisciplinario es esencial para desarrollar modelos precisos y predictivos sobre el comportamiento de las formaciones geológicas en diversos contextos industriales y científicos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis de secciones de campo

En el campo, el techo de la Unidad inferior y la base de la Unidad intermedia se puede observar en canteras. Estas canteras se han utilizado para la extracción de yeso como roca industrial. La Unidad Inferior se encuentra formada por cuerpos de entre 4 y 5 metros de espesor de yesos laminados. En ocasiones, intercalados aparecen niveles de 20 a 80 cm de lutitas verdes, con alto contenido en materia orgánica (Fig. 8). A techo se encuentra una superficie de karstificación, que llega a quedar representada por una disolución de hasta 3-4 metros de las capas inferiores.

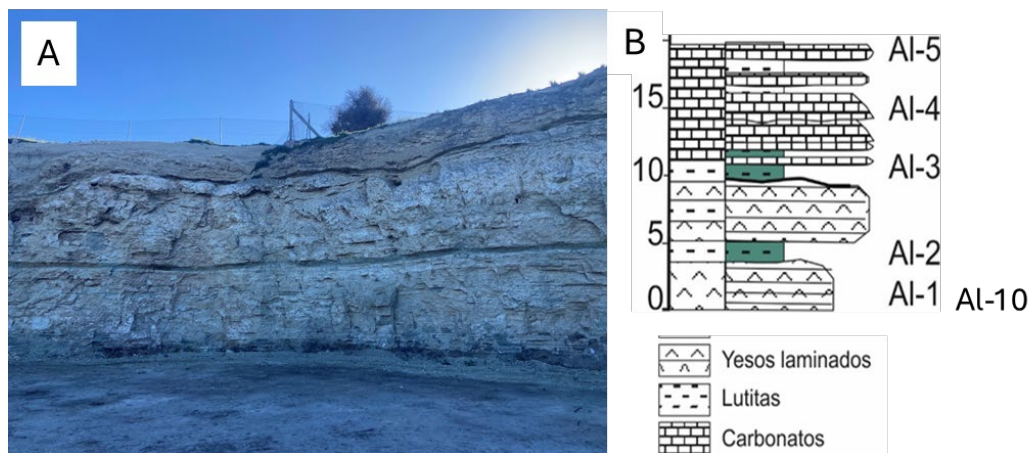


Figura 8. A) Imagen de campo de la sección analizada 1, donde se puede ver el contacto entre la unidad inferior y la intermedia. B) Columna de campo con yesos, lutitas y carbonatos, indicándose las muestras a analizar.

Hacia el centro de la cuenca (en este caso situado al norte de Alameda de la Sagra), los bancos de la unidad Intermedia son más abundantes y de mayor espesor, y en este caso los bancos de carbonato han desaparecido (Fig. 9) El que no haya carbonatos y más yesos implica que esta zona representa facies del centro de la cuenca.

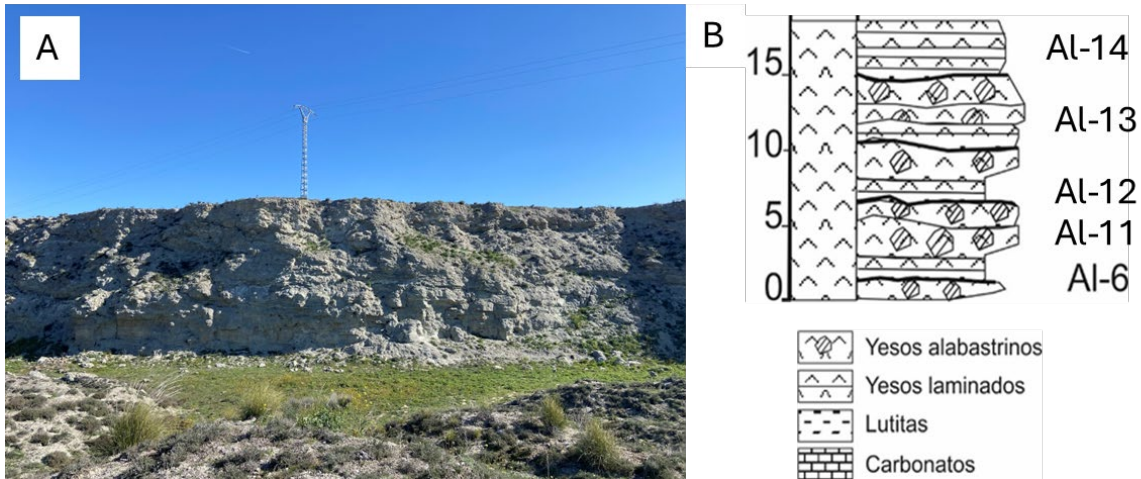


Figura 9. A) Imagen de campo de la sección analizada 2, donde se puede ver el contacto entre la unidad inferior y la intermedia. B) Columna de campo con yesos, que pasan a yesos alabastrino con indicación de las muestras a analizar.

Por encima de esta superficie se encuentran, dependiendo de la sección: a) bancos de carbonatos de 10 a 50 cm de espesor que alternan con niveles centímetros de margas que en ocasiones presentan alto contenido en materia orgánica; los bancos de carbonatos presentan moldes internos de evaporitas, e incluso geodas que han sido cementadas por cristales de yeso; b) bancos de yesos alabastrinos (Fig. 10) que componen bancos de 4-5 metros de espesor. Estos bancos están separados entre sí por superficies irregulares resultado de procesos de disolución.

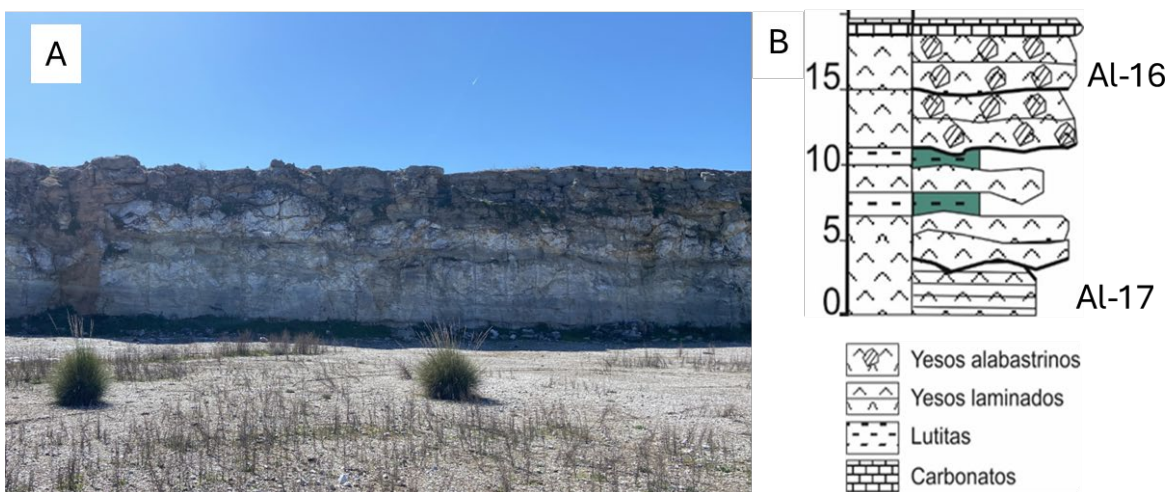


Figura 10. A) Imagen de campo de la sección analizada 2, donde se puede ver el contacto entre la unidad inferior y la intermedia. B) Columna de campo con yesos, lutitas, que pasan a yesos alabastrinos y carbonatos con indicación de las muestras a analizar.

## **4.2 Descripción láminas**

En este apartado se presentan los datos obtenidos a partir del análisis detallado de varias láminas delgadas. Las observaciones se centran en la identificación de las diferentes fases minerales, texturas y estructuras sedimentarias presentes en cada muestra. Se han observado procesos diagenéticos, como reemplazamientos minerales, cementación y disolución, los cuales proporcionan información crucial sobre la evolución de diagenética y el ambiente deposicional de las rocas estudiadas. Cada lámina delgada ha sido examinada minuciosamente para entender las interacciones mineralógicas y los procesos geológicos que han influido en su formación y alteración. Se han estudiado las láminas AL-1; AL-2; AL-3; AL-4; AL-5; AL-6; AL-10; AL-11; AL-12; AL-13; AL-14; AL-16 y AL-17.

### **Lámina AL-1**

La lamina presenta micrita con restos de peloides, así como cristales lenticulares de yeso. La lámina exhibe una gran diversidad en el tamaño de los cristales de yeso. Existen zonas donde los cristales pequeños miden aproximadamente 0,1 mm, mientras que los cristales más grandes pueden superar 1 mm.

Estos cristales de yeso han sido recristalizados, ya que en algunos casos presentan indentaciones de unos cristales con otros, lo que sugiere una recristalización. Estos yesos lenticulares se formaron originalmente creciendo dentro del sedimento rico en materia orgánica por crecimiento competitivo (Escavy & Herrero, 20191, Schreiber & El Tabakh, 2000). Más tarde sufrieron procesos diagenéticos de recristalización. Los peloides indican condiciones de contenido de materia orgánica en el fondo del lago, así como formación en ambiente de baja energía.

### **Lámina AL-2**

Esta lámina presenta una matriz micrítica, una roca de grano fino compuesta principalmente de carbonato de calcio con peloides. Los peloides son típicos de ambientes sedimentarios poco profundos y con poca o ligera agitación del agua.

Además de los componentes carbonáticos, se observan algunos granos de cuarzo, que son el indicativo de un aporte siliciclástico en el entorno sedimentario. La mezcla de componentes siliciclásticos (como el cuarzo) y carbonáticos (como la micrita y los peloides) sugiere que es una roca margosa. Este tipo de roca indica un ambiente de deposicional con aportes mixtos, posiblemente cercano a una fuente de sedimentos terrígenos, un ambiente sedimentario influenciado por eventos de alta energía, como corrientes de tormenta. Estas corrientes podrían haber transportado sedimentos desde áreas más elevadas hacia el lago, depositando una mezcla heterogénea de materiales.

La lámina presenta cristales de yeso lenticulares, que también han crecido dentro del sedimento, lo cual sugiere episodios de evaporación y precipitación de sulfato de calcio en el entorno sedimentario.

### **Lámina AL-3**

La lámina AL-3. Roca carbonática, presenta una matriz micrítica con una presencia de lenticulares de yeso que han sido reemplazadas por carbonato. La micrita, que es un carbonato microcristalino, constituye la base de la estructura sedimentaria. Además, hay evidencia de procesos de disolución de las lenticulas de yeso y cementación carbonática posterior.

Dentro de la matriz de micrita, se identifican granos de cuarzo y plagioclasas. Los granos de cuarzo, junto con las plagioclasas indican un transporte y deposición en un ambiente sedimentario de cierto grado de energía, iniciando entradas de material detrítico transportado al lago.

### **Lámina AL-4**

La lámina está predominantemente compuesta por carbonato, reflejando un ambiente sedimentario donde la sedimentación del carbonato fue el proceso principal.

La micrita de carbonato de calcio de grano fino ha sufrido recristalización transformándose a pseudosparita, que es una textura de cristales más gruesa (entre 4-10 micras) que se forma a partir de la recristalización de la micrita sin alcanzar el tamaño de los cristales de esparita.

Existe algo de porosidad primaria posiblemente fenestral. La porosidad fenestral se caracteriza por cavidades irregulares y alargadas, formadas en ambientes con alta actividad biológica o de algas, o también por burbujas de gas atrapadas en sedimentos. Esta porosidad está cementada por carbonato, reduciendo así la porosidad original.

En algunas zonas de la lámina se observan microfracturas. Estas pequeñas fracturas pueden haberse formado por procesos diagenéticos edáficos, con la generación de microkarstificaciones.. La existencia de los procesos edáficos indica que este material ha podido estar sujeto a alternancia de periodos bajo lámina de agua y periodos de exposición subaérea, en zonas de borde del lago.

### **Lámina AL-5**

La lámina AL-5 está dominada por micrita, típica de ambientes sedimentarios de baja energía donde las partículas finas pueden depositarse y consolidarse. Es similar a la AL-3 en su composición micrítica y cementos de carbonatos. La principal diferencia es la presencia de pseudomorfo de yeso: lenticulas de yeso formadas originalmente con crecimiento

competitivo en el material carbonático que posteriormente han sido disueltos y cementados por cemento carbonático en mosaico. (Fig. 11A).

### **Lámina AL-6**

Esta presenta grandes cristales de yeso secundario (Fig. 11B), alcanzando tamaños de hasta 1 mm. Este yeso se ha formado a partir de procesos diagenéticos que implican el reemplazamiento de otras fases minerales, como la glauberita (Ortí, 2000). Se observan cristales de yeso alabastrino. (Fig. 11B)

Los cristales de yeso han crecido de manera competitiva (Fig. 11C). Este proceso de crecimiento competitivo a menudo empuja el material circundante hacia los bordes de los cristales. El material desplazado es micrita. En algunas ocasiones, se observa algo de porosidad dentro de la lámina, indicando que no todo el espacio intersticial fue completamente cementado o que la transformación de glauberita a yeso produjo cambios de volumen que dieron lugar a algo de porosidad (Fig. 11D), posiblemente debido a cambios en la química del ambiente diagenético, como variaciones en la salinidad (contacto con agua menos salina) o en la disponibilidad de iones. La micrita desplazada hacia los bordes de los cristales sugiere que los cristales de yeso crecieron en una matriz de carbonato de grano muy fino.

### **Lámina AL-10**

La lámina AL-10 contiene yeso secundario, el cual se ha formado a partir de procesos diagenéticos que implican recristalización o reemplazamiento de minerales preexistentes, en este caso de anhidrita. Se encuentra rodeado por micrita (Fig. 11E).

El yeso en el campo presenta textura alabastrina, y en la lámina se pueden observar restos de inclusiones de anhidrita dentro de los cristales de yeso, lo cual indica que la transformación diagenética ha sido la transformación anhidrita-yeso.

### **Lámina AL-11**

Esta lámina contiene cristales de yeso secundarios que se han formado a través de procesos de recristalización. Estos cristales son el resultado del reemplazamiento de la glauberita. Los cristales de yeso secundario han crecido de manera que empujan la micrita hacia los bordes de los cristales de yeso. Similar a la lámina AL-10.

### **Lámina AL-12**

Se observan cristales de yeso con forma lenticular que han sido reemplazados. Estos cristales lenticulares de yeso se formaron inicialmente dentro de la matriz micrítica y posteriormente sufrieron procesos de reemplazamiento. Aparte de los cristales de yeso

lenticular reemplazados, también se observan cristales con indentaciones lo que indica que ha habido procesos de recristalización (Fig. 11F).

El yeso secundario se formó inicialmente como cristales lenticulares dentro de una matriz micrítica y que luego sufrió procesos de reemplazamiento. Este entorno sugiere un ambiente de baja energía donde los sedimentos finos y los cristales de yeso pudieron acumularse y posteriormente experimentar cambios diagenéticos.

### **Lámina AL-13**

La lámina AL-13 presenta yeso secundario que se ha desarrollado mediante procesos diagenéticos. Este yeso se originó a partir de la recristalización de la glauberita.

Los cristales de yeso muestran un patrón de crecimiento competitivo. Este tipo de crecimiento ocurre cuando múltiples cristales se desarrollan simultáneamente y compiten por espacio y recursos, lo que puede llevar a formas elongadas y entrelazadas, esto sugiere un ambiente en el que los cristales tuvieron que luchar por espacio y nutrientes.

### **Lámina AL-14**

Al igual que la lámina AL-13, esta lámina contiene yeso secundario, que se ha formado a través de procesos diagenéticos, específicamente a partir del reemplazo de glauberita.

También se observa un crecimiento competitivo entre los cristales

### **Lámina AL-16**

En la lámina delgada (Fig. 11G) se observa un yeso secundario transformado a partir de anhidrita, caracterizado por la presencia de cristales de yeso interdentados. Toda la lámina está compuesta por este yeso secundario transformado de anhidrita, que no se observa en la lámina, pero en el campo son nódulos de yeso alabastrino. No se observa porosidad en la lámina, ya que toda la porosidad original se ha cerrado, lo que indica que el material es muy adecuado para aplicaciones de sellado.

### **Lámina AL-17**

Contiene yeso primario en asociación con micrita. Se observan cristales lenticulares de yeso (Fig. 11H). Estos cristales tienen una relación elevada entre el eje largo y el eje corto de más de 1, lo que les confiere una forma alargada y aplanada.

La coexistencia de micrita y yeso lenticular en la lámina indica que estos cristales de yeso se formaron y acumularon en un ambiente lacustre con abundante materia orgánica.

La lámina AL-17 refleja un ambiente lacustre en el que la precipitación del yeso primario ocurrió directamente desde el agua del lago.

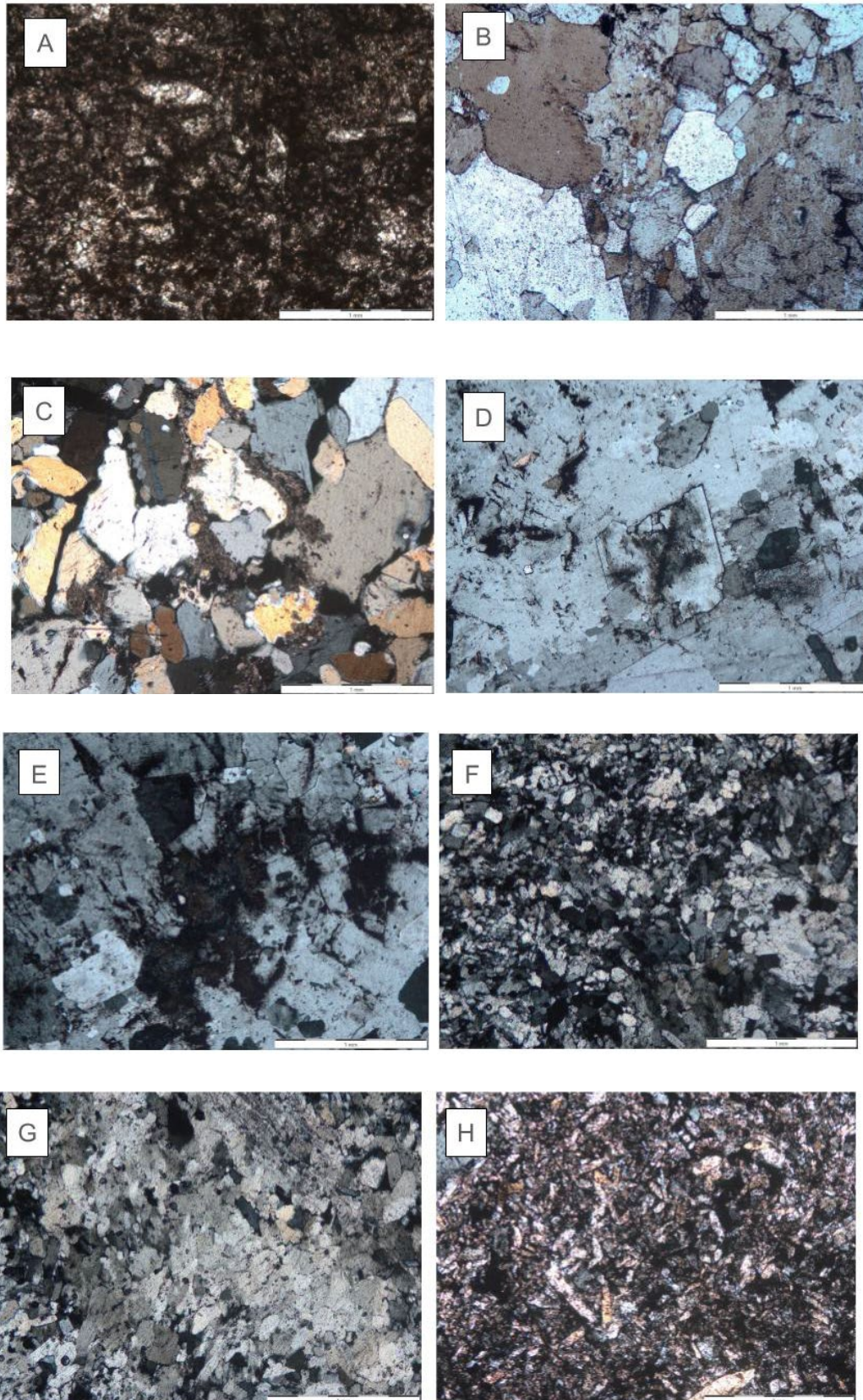


Figura 11. A) AL-5 Peloides con pseudomorfos de lenticulas de yeso reemplazados por carbonato. B) AL-6 Yeso secundario donde se observan las piezas de yeso interdentados. C) AL-6 Crecimiento competitivo de yeso secundario con cristales interdentados; D) AL-6 Yeso secundario formado a partir de una disolución incongruente de glauberita resultando en yeso y un agua rica en sulfato y sodio; a; E) AL-10 Yesos macrocristalinos secundarios,

*con matriz acumulada en ciertas zonas resultado del crecimiento competitivo (disolución incongruente de glauberita); F) AL-12 Yeso secundario con cristales de yeso interdentados (secundario); G) AL-16 Nódulo de anhidrita reemplazado por yeso secundario; H) AL-17 Cristales de yeso primario lenticular de la unidad intermedia;*

### **4.3 Análisis petrofísico**

En este apartado se discuten los datos obtenidos a partir del análisis petrofísico de las muestras. Las observaciones se centran en la caracterización de las propiedades físicas y químicas de las rocas, utilizando diversas técnicas avanzadas. Se ha empleado la propagación ultrasónica para evaluar las propiedades elásticas y la integridad estructural de las muestras. El ensayo de absorción y desorción ha sido utilizado para determinar la capacidad de las rocas para retener y liberar fluidos, proporcionando información crucial sobre la porosidad y la superficie específica. Además, se ha realizado también el ensayo de permeabilidad, para medir la capacidad de las formaciones rocosas para permitir el flujo de fluidos a través de sus poros.

Estos parámetros petrofísicos son esenciales para comprender la capacidad de almacenamiento y flujo de fluidos en las formaciones rocosas. Cada muestra ha sido analizada meticulosamente para determinar sus propiedades petrofísicas y cómo estas se relacionan con los procesos geológicos y las condiciones ambientales. Los resultados obtenidos proporcionan una visión integral sobre el comportamiento de las rocas bajo diferentes condiciones de presión y temperatura.

Para el análisis petrofísico solo se han utilizado varias muestras representativas de las distintas petrofacies establecidas mediante el estudio de lámina delgada.

#### **4.3.1. Propagación ultrasónica de las ondas P y anisotropía**

A través de este ensayo de propagación ultrasónica, se calcula la velocidad de propagación de ondas P ( $V_p$ ), el grado de anisotropía total ( $dM$ ) y la anisotropía relativa ( $dm$ ). En la Tabla 1) se pueden observar los valores medios obtenidos de cada probeta.

La anisotropía relativa se refiere a la variación de una propiedad física en diferentes direcciones en un material, comparada con una referencia o en relación con otra dirección específica. Es una medida de lo distinta que es una propiedad en una dirección respecto a otra.

La anisotropía total es una medida integral de la variación de una propiedad física en todas las direcciones de un material. Considera todas las posibles direcciones y cuantifica el grado general de anisotropía en el material, proporcionando una visión completa de cómo varía la propiedad en todas las orientaciones.

Tabla 1. Valores medios de velocidad de ondas P ( $V_p$ ), anisotropía total ( $dM$ ), anisotropía relativa ( $dm$ ) y anisotropía completa ( $dM+dm$ ). Las muestras AL-2 y AL-5 han presentado problemas durante el ensayo de anisotropía, se ha decidido no tomar en cuenta sus mediciones ya que no eran muy viables.

Muestra	$V_p$ (m/s)	$dM$ (%)	$dm$ (%)	$dM+dm$ (%)
AL 1	1719	21,63	3,41	25,04
AL 3	2170	31,78	19,7	51,48
AL 6	3850	2,74	2,4	5,14
AL 16	5975	2,52	2,77	5,29

La muestra AL-1 tiene una velocidad de propagación de 1719 m/s, es un material anisótropo con una dirección clara de anisotropía a lo largo del eje Z, sus propiedades físicas, como la velocidad de propagación de las ondas P, varían significativamente cuando se miden en la dirección del eje Z, estas en ocasiones disminuyen o aumentan tal y como se observa en la Tabla 2. Esto significa que tiene una estructura interna ordenada en esta dirección. Este tipo de anisotropía puede deberse a la orientación de los cristales.

Tabla 2. Valores del ensayo de ultrasonidos para las muestras AL-1, AL-3, AL-6 y AL-16.

Muestra	Dirección	n°	d (mm)	t ( $\mu$ s)	v (m/s)	vd med	v med	StD	StD	dM	dm
AL-1	X	1	44,9	25	1796	1883,74	1719	77,66	228,66	21,63	3,41
		2	43,01	22,5	1912						
		3	41,4	21,3	1944						
	Y	1	53,9	30,5	1767	1820,61					
		2	56,97	30,4	1874						
		3									
	Z	1	34,6	26,9	1286	1451,64					
		2	36,06	22,3	1617						
		3									
AL-3	x	1	35,4	17	2082	2188,54	2170	150,18	469,27	31,78	19,70
		2	30,52	13,3	2295						
		3									
	y	1	39,98	14,3	2796	2666,74					
		2	35,02	13,8	2538						
		3									
	z	1	35,78	20,3	1763	1656,04					
		2	32,23	20,8	1550						
		3									
AL-6	x	1	63,08	16,7	3777	3778,61	3850	49,89	185,09	2,74	2,40
		2	63,4	17	3729						
		3	64,33	16,8	3829						
	Y	1	47,25	11,9	3971	3931,71					
		2	48,43	11,8	4104						
		3	51,34	13,8	3720						
	z	1	50,96	12,8	3981	3838,38					
		2	49,43	12,3	4019						
		3	39,37	11,2	3515						
AL-16	X	1	88,26	14,9	5923	6109,27	5975	190,58	370,82	2,52	2,77
		2	87,84	14,4	6100						
		3	87,63	13,9	6304						
	Y	1	89,59	14,1	6354	5942,26					
		2	89,51	14,2	6304						
		3	89,43	17,3	5169						
	Z	1	87,84	15,3	5741	5874,21					
		2	87,78	15	5852						
		3	88,03	14,6	6029						

A diferencia de la AL-1, la muestra AL-3 tiene una velocidad de propagación de 2170 m/s y presenta anisotropía en todas las direcciones. Esto implica que no existe una dirección preferencial de anisotropía, lo que sugiere una estructura interna más compleja y heterogénea. Puede ser el resultado de una distribución irregular de los componentes del material o de las variaciones en la composición.

Las muestras AL-6 y AL-16 tienen valores altos de propagación de las ondas P (3850 m/s; 5975 m/s). Estos valores elevados indican que la masa es más densa y que tiene poca porosidad, La baja porosidad sugiere que hay menos espacios en el material, lo que permite una transmisión más rápida de las ondas P. Este tipo de resultados son deseables para materiales que requieren una baja absorción de fluidos.

Tal y como se puede observar en la Figura 12, las muestras AL-1 y AL-3 tienen una alta anisotropía (20%), lo que indica una estructura interna más irregular, la velocidad de propagación es más baja debido a estas características anisotrópicas. Las muestras AL-6 y AL-16 tienen baja anisotropía (aproximadamente un 5%) y altas velocidades de propagación, lo que indica que estas muestras son más homogéneas, con baja porosidad y una estructura sólida densa, que permite una transmisión más rápida de las ondas P.

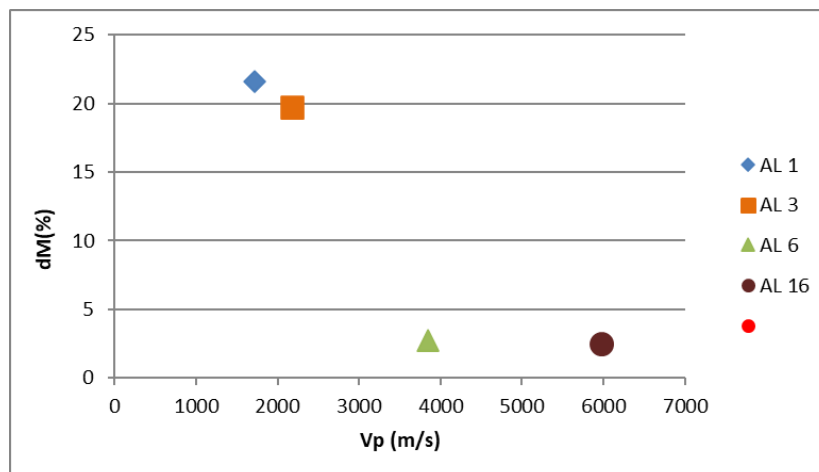


Figura 12. Reacción entre la velocidad de ondas P ( $V_p$ ) y la anisotropía total ( $dM\%$ )

La relación de la anisotropía total y la anisotropía relativa presentadas en la Figura 13 indica que las muestras con alta anisotropía total también tienden a tener alta anisotropía relativa. Las muestras homogéneas con baja porosidad y alta densidad (AL-6 y AL-16) tienen bajas anisotropías tanto absolutas como relativas y las muestras con estructuras internas más complejas y direccionales (AL-1 y AL-3) presentan mayores anisotropías en ambos aspectos.

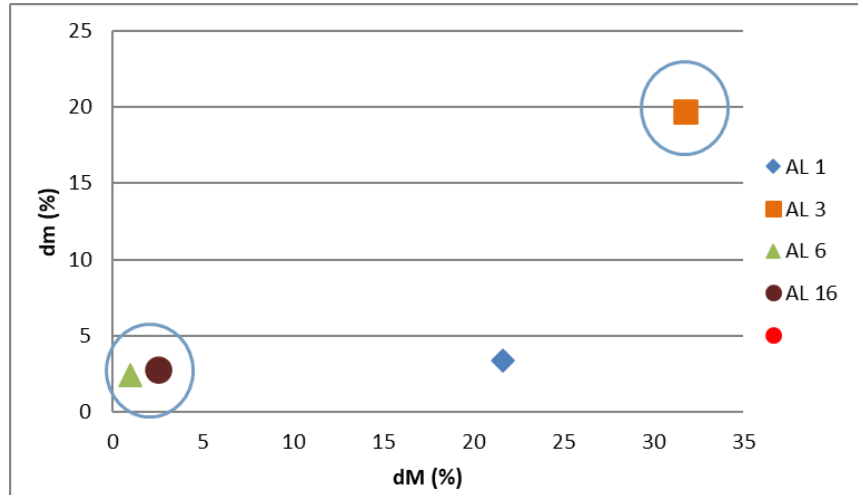


Figura 13. Relación entre la anisotropía total (dM%) y la anisotropía relativa (dm%).

#### 4.3.2 Ensayo de absorción por inmersión y desorción por evaporación del agua a presión atmosférica.

El ensayo de absorción por inmersión y desorción por evaporación del agua a presión atmosférica (Tabla 3) se llevó a cabo tras la realización de los ensayos de propagación ultrasónica y de anisotropía, para determinar qué muestras podrían ser un posible sello de almacén de hidrógeno determinando la porosidad de estas. Se evaluaron las capacidades de absorción de agua y el comportamiento frente a la disolución, así como la integridad estructural durante y después de estos procesos.

La muestra AL-1 absorbió aproximadamente un 1% de agua y a pesar de la baja absorción, la inmersión causó su disgregación completa, mostrando una pobre resistencia frente al agua (Tabla 4).

Las muestras AL-3 y AL-5 son las que presentan los mayores coeficientes de absorción, con valores entre 7-11%. Estas muestras absorbieron la mayor cantidad de agua en los primeros 2-3 minutos, después la capacidad de absorción se mantuvo constante durante el resto del ensayo.

En cuanto a las muestra AL-6 y AL-16 no mostraron capacidad de absorción de agua, alcanzaron sus valores máximos de absorción (1-1.5%) después de estar sumergidas entre 2-5 horas (Fig. 14). En el gráfico se observan variaciones en las líneas de absorción de estas muestras, lo que indica que la roca ya está sobresaturada y trata de absorber más agua, pero su estructura interna no lo permite hayan cambiado su estructura interna ya que al final del ensayo pesaban menos que al principio, aunque visualmente no se observaba ninguna diferencia.

Tabla 3. Tabla de datos con las medidas de absorción-desorción del agua

Fecha	Medida	Hora	Minutos	Seg	t(s) <sup>1/2</sup>	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
04/03/2024	10:00	0	0	0	0	179,5	158,74	193,31	141,07	161,16	181,69	259,82	319,55	263,4	294,6
04/03/2024	12:10	0	2	24	12	181,91	164,66	212,72	153,28	180,84	192,9	263,79	323,92	264,45	295,24
04/03/2024	12:20	0	9	36	24	179,18	164,59	212,9	153,52	180,08	192,96	263,82	324,15	264,24	295,11
04/03/2024	12:35	0	21	36	36	170,58	164,43	212,39	153,52	180,19	193,01	263,9	324,24	264,22	294,97
04/03/2024	13:00	0	38	24	48	168,21	164,44	212,53	153,59	179,92	193,18	263,76	324,33	264,23	294,95
04/03/2024	13:20	1	0	0	60	167,84	164,27	212,57	153,63	179,83	193,18	263,72	324,45	266,41	295
04/03/2024	14:20	1	57	36	84	167,42	164,13	212,38	153,63	178,77	193,38	263,76	324,62	266,38	297,52
04/03/2024	15:30	3	14	24	108	165,68	164,12	212,32	153,58	178,73	193,52	263,6	324,66	266,19	297,14
04/03/2024	17:15	4	50	24	132	164,9	164,1	212,74	153,69	178,43	193,64	263,5	324,7	265,99	297,09
05/03/2024	11:00	25	0	0	300	163,26	164,2	213,18	154,09	178,75	194,99	262,76	324,06	262,99	293,45
06/03/2024	11:00	47	36	36	414	163,98	164,49	213,41	154,36	179,14	194,26	262,24	324	263,74	293,29
07/03/2024	11:00	72	0	0	509,1	161,32	164,56	214,03	154,35	179,36	194,08	262,16	323,55	263,21	293,89
08/03/2024	11:00	96	0	0	587,9	160,44	164,59	213,88	154,5	179,44	194,06	261,87	323,31	263,12	293,77
11/03/2024	10:05	169	0	0	780	159,95	164,9	214,15	155,23	180,2	194,3	261,09	323,25	263,52	294,22
11/03/2024	10:14	169	9	36	780,4	154,26	164,75	213,61	154,66	179,71	194,06	261,58	323,2	262,81	293,43
11/03/2024	10:26	169	21	36	780,8	153,5	164,61	213,46	154,54	179,55	193,94	264,45	323,06	262,63	293,3
11/03/2024	10:46	169	38	24	781,5	153,31	164,47	213,29	154,4	179,4	193,78	261,2	322,88	262,37	293,14
11/03/2024	11:05	170	0	0	782,3	153,04	164,32	213,11	154,27	179,27	193,63	260,9	322,66	262,11	292,96
11/03/2024	12:05	170	57	36	784,5	152,57	163,93	212,69	153,95	178,95	193,16	260,18	322,16	261,31	292,09
11/03/2024	13:20	172	14	24	787,4	152,1	163,47	212,02	153,36	178,41	192,35	259,4	321,61	260,6	291,36
11/03/2024	14:55	173	50	24	791,1	151,61	162,86	211,21	152,71	177,7	191,38	258,83	321,15	259,2	290,88
12/03/2024	11:00	194	0	0	835,7	148,03	158,73	200,68	145,66	167,44	183,84	257,61	319,22	258,98	289,73
13/03/2024	11:00	216	36	36	883,1	143,53	157,91	193,88	141,91	158,37	181,66	257,13	318,3	258,77	289,5
14/03/2024	11:00	241	0	0	931,5	143,41	157,76	192,76	141,09	156,85	181,04	256,81	316,79	258,53	289,34
15/03/2024	11:00	265	0	0	976,7	143,29	157,7	192,62	141,02	156,63	180,94	256,61	317,49	258,81	289,49
					Medida Final	143,17	157,69	192,67	141,1	156,67	180,98	256,65	317,02	258,79	289,47
					pHigrostatico	85,29	89,2	115,16	87,38	95,78	113,5	148,3	181,53	143,95	161,97

Los resultados de la desorción inicial indican que la pérdida de agua absorbida fue lenta, escasa y progresiva, durante las primeras 5 horas bajo los efectos de la evaporación. Al cabo de 24 horas, todas las muestras habían perdido el total del agua absorbida, también se observó una pérdida de material en la mayoría de las muestras tras el proceso de desorción, indicando daños estructurales causados por la absorción y evaporación del agua.

Tabla 4. Coeficiente de absorción y desorción de las muestras estudiadas.

AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,34	3,729,368,779	10,040,867	8,655,277,522	1,221,146,687	6,169,849,744	152,798,091	1,367,548,115	0,3986332574	0,2172437203
82729805	3,685,271,513	1,013,398,169	8,825,405,827	1,173,988,583	6,202,873,025	1,539,527,365	1,439,524,331	0,3189066059	0,1731160896
9,359,331	3,584,477,762	9,870,156,743	8,825,405,827	1,180,814,098	6,230,392,427	1,570,317,912	1,467,688,938	0,3113135915	0,1255940258
9,693,593	3,590,777,372	9,942,579,277	8,875,026,583	1,164,060,561	6,323,958,391	1,516,434,455	1,495,853,544	0,3151100987	0,1188051595
15,821,727	3,483,684,012	9,963,271,429	89,033,813	1,158,476,049	6,323,958,391	1,501,039,181	1,533,406,353	1,142,748,671	0,1357773252
9,805,014	339,548,948	9,864,983,705	89,033,813	1,092,702,904	6,434,035,995	1,516,434,455	1,586,606,165	113,135,915	0,9911744739
9,164,345	338,918,987	9,833,945,476	8,867,937,903	1,090,220,898	6,511,090,319	145,485,336	1,599,123,768	1,059,225,513	0,8621860149
13,704,735	3,376,590,651	1,005,121,308	8,945,913,376	1,071,605,858	6,577,136,882	1,416,365,176	1,611,641,371	0,9832953683	0,8452138493
1,735,376	3,439,586,746	1,027,882,675	9,229,460,551	1,091,461,901	7,320,160,713	1,131,552,613	1,411,359,725	-0,1556567957	-0,3903598099
-8,65	3,62	10,40	9,42	11,16	6,92	0,93	1,32	0,13	-0,44
1,281,337	3,666,372,685	10,718,535	9,413,766,215	1,129,312,484	6,819,307,612	0,9006235086	1,251,760,288	0,07213363705	-0,2410047522
1,183,844	3,685,271,513	1,064,093,942	9,520,096,406	1,134,276,495	6,808,299,851	0,7890077746	1,176,654,671	-0,106302202	-0,2817379498
3,913,649	3,88	10,78	10,04	11,81	6,94	0,49	1,16	0,05	-0,13
	3,786,065,264	1,050,126,739	9,633,515,276	1,151,030,032	6,808,299,851	0,6773920406	1,142,231,263	-0,2239939256	-0,3971486762
	3,697,870,732	1,042,367,182	9,548,451,124	114,110,201	6,742,253,289	1,782,002,925	1,098,419,653	-0,2923310554	-0,4412763069
	36,096,762	1,033,573,017	9,449,209,612	113,179,449	6,654,191,205	0,531136941	104,209,044	-0,391040243	-0,4955872369
	3,515,182,059	1,024,261,549	935,705,678	1,123,727,972	6,571,633,001	0,4156723886	0,9732436238	-0,4897494305	-0,5566870333
	3,269,497,291	1,002,534,789	913,021,904	1,103,871,929	631,295,063	0,1385574629	0,8167735879	-0,7934700076	-0,8520027155
	2,979,715,258	9,678,754,332	8,711,986,957	1,070,364,855	5,867,136,331	-0,1616503733	0,6446565483	-106,302,202	-1,099,796,334
	2,595,439,083	9,259,738,244	8,251,222,797	1,026,309,258	5,333,259,948	-0,3810330229	0,5007041152	-159,453,303	-1,262,729,124
	0,0062996094 24	3,812,529,098	3,253,703,835	3,896,748,573	1,183,334,251	-0,8505888692	0,1032702238	-1,678,056,188	-1,653,088,934
	0,5228675822	0,2948631731	0,5954490678	-1,731,198,809	0,0715504430 6	-1,035,332,153	-0,39117509	-175,778,284	-1,731,160,896
	0,6173617236	0,2845170969	0,0141773587 6	-2,674,360,884	0,3577522153	-1,158,494,342	0,8637145987	-1,848,899,013	-1,785,471,826
	0,6551593801	0,3569396306	0,0354433969	-2,810,871,184	0,4127910177	-123,547,071	0,644665483	-1,742,596,811	-1,734,555,329

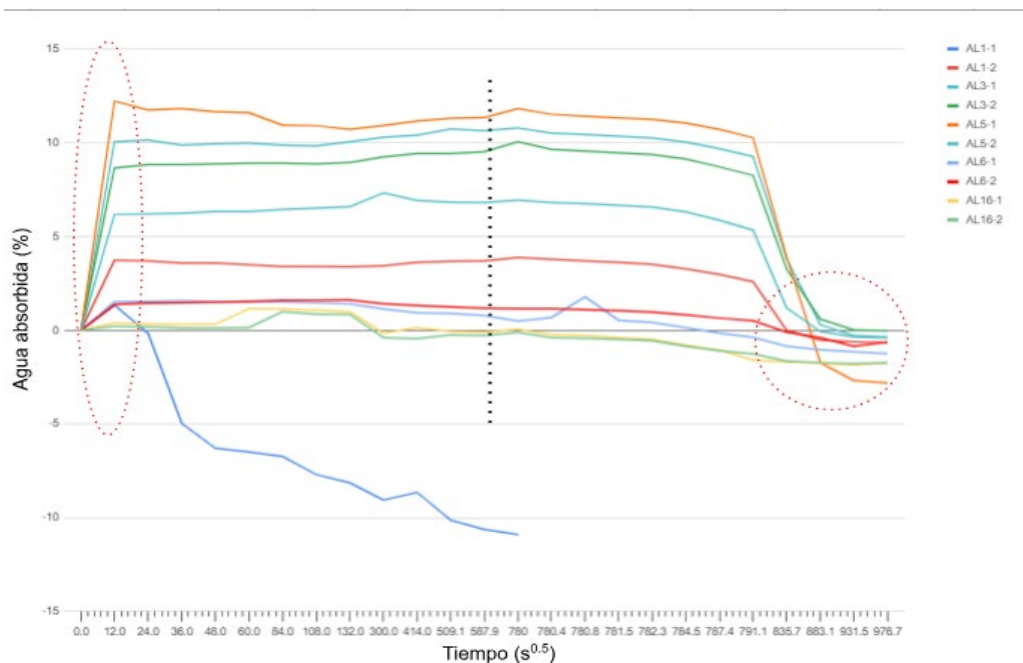


Figura 14. Gráfico de absorción-desorción del agua frente al tiempo del ensayo.

#### 4.3.3. Ensayo de saturación

En el ensayo de saturación, se ha observado que los valores de las densidades reales (Tabla 5) de las muestras analizadas superan los  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

Las muestras AL-3 y AL-5 presentan alta porosidad. Esta porosidad implica la presencia de numerosos espacios vacíos dentro de la estructura del material, lo que afecta tanto su densidad aparente como su capacidad de absorción. En contraste, las muestras AL-6 y AL-16 donde la porosidad es totalmente ausente. Esta característica contribuye a un índice de masa o capacidad cercano a 1, lo que significa que el material está casi completamente libre de vacíos y posee una densidad mucho más uniforme.

La saturación en agua de las muestras coincide directamente con el coeficiente de absorción observado. El coeficiente de absorción refleja la cantidad de agua que el material puede retener en relación con su peso. En las muestras con alta porosidad AL-3 y AL-5, el coeficiente de absorción es significativamente mayor, lo que coincide con su mayor capacidad de saturación en comparación con las muestras de baja porosidad. Por otro lado, para las muestras de baja porosidad, la saturación en agua es mínima, al igual que el coeficiente de absorción.

Tabla 5. Tabla con los valores de densidad normal, densidad aparente, porosidad abierta, porosidad total, porosidad retenida y saturación de cada muestra.

Densidad real	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
	2,404	2,283	2,474	2,627	2,465	2,664	2,330	2,315	2,205	2,221
	2404	2283	2474	2627	2465	2664	2330	2315	2205	2221
Densidad aparente	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
	2,399	2,093	1,949	2,075	1,905	2,244	2,299	2,250	2,198	2,223
	2399	2093	1949	2075	1905	2244	2299	2250	2198	2223
Porosidad abierta	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
		8,14	21,05	20,87	22,55	15,61	1,13	2,61	0,10	0,28
Porosidad Total	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
	0,2	8,32	21,21	21,03	22,71	15,78	1,32	2,81	0,30	0,086
Porosidad retenida	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
		0,184	0,158	0,158	0,155	0,169	0,198	0,195	0,19	0,20
Saturación en agua	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
		3,88	10,78	10,04	11,81	6,94	0,49	1,16	0,045	0,12
Compacidad (1-0)	AL1-1	AL1-2	AL3-1	AL3-2	AL5-1	AL5-2	AL6-1	AL6-2	AL16-1	AL16-2
	1,00	0,92	0,79	0,79	0,77	0,84	0,99	0,97	0,99	1,00

#### 4.3.4 Ensayo de permeabilidad al aire



El ensayo de permeabilidad al aire es crucial para evaluar la capacidad de un material para permitir el paso del aire a través de su estructura. Este ensayo es especialmente importante donde la baja permeabilidad y el almacenamiento son críticos, como en el almacenamiento de gases, incluyendo el hidrógeno.

Muestras AL-1 presentan permeabilidad al aire (Tabla 6), la estructura de la muestra permite el paso del aire, lo que sugiere cierta porosidad y un comportamiento anisotrópico.

En el caso de la muestra AL-3 tiene muy poca permeabilidad, indicando una estructura más densa y menos porosa en comparación con AL-1.

Las muestras AL-5, AL-6, AL-16, son completamente impermeables sugiriendo una estructura altamente densa y sin porosidad (Fig.15).

Tabla 6. Valores de permeabilidad al aire de las muestras.

				METODOS DE ENSAYO PARA PIEDRA NATURAL DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE EN ROCA CON EL EQUIPO TinyPerm II				
LPF:		REALIZADO POR:	IASMYNA STAN		Fecha:	23/04/24		
MUESTRAS	MEDIDAS					VALOR MEDIO	Desviación típica	PERMEABILIDAD
	1	2	3	4	5			
AL-1	11.2	11.3				11.25	0.07071068	95.21
AL-3	12.5	10.92				11.71	1.11722871	26.19
AL-5	12.01					12.01		11.29
AL-6	12.5					12.5		2.85
AL-16	12.48					12.48		3.02

Observaciones: La permeabilidad se calcula aplicando la ecuación  $T = -0,8206 \cdot \log_{10}(K) + 12,8737$  según la recta de calibración proporcionada por el equipo y se mide en miliDarcy.

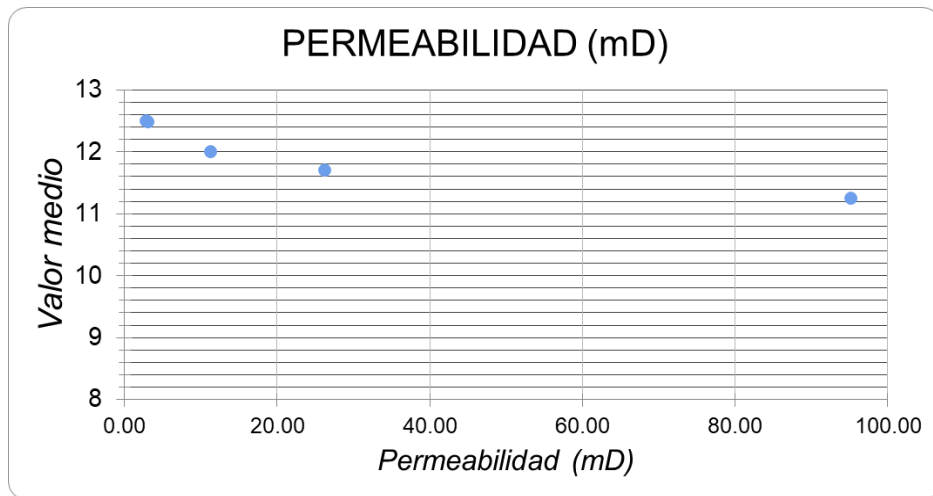


Figura 15. Valores de permeabilidad al aire en las diferentes muestras.

#### 4.4 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El estudio de las muestras con microscopía electrónica de barrido (SEM) se ha realizado con el objetivo de analizar el tipo y la cantidad de porosidad de la muestra que en los ensayos petrofísicos ha obtenido los valores más pequeños para la porosidad y permeabilidad, está siendo la muestra AL-16. El SEM permitió una observación detallada de la microestructura de la muestra, revelando la presencia de cristales de celestina (Fig. 16) y barita, sulfatos que indican ambientes sedimentarios lacustres.

En el Microscopio electrónico de barrido (SEM) se ha estudiado una muestra de yeso alabastrino. En ella los cristales de yeso, en ocasiones se observan ciertos grados de deformación. Estos cristales son secundarios (observados en la lámina delgada), resultados

de transformaciones de glauberitas previas, ya que presentan la morfología típica de estos yesos secundarios. En la lámina delgada se observa el crecimiento competitivo de estos cristales, que desplazan hacia sus bordes materiales residuales de origen primario como la micrita. Estas transformaciones en ocasiones realizan cambios de volúmenes que pueden generar porosidades secundarias, pero en el SEM hemos podido observar que estas porosidades se encuentran aisladas, de forma que no hay permeabilidad en la muestra (Fig. 17). Esto concuerda con los resultados del análisis petrofísico, los que indican que, aunque existe porosidad en la muestra, ésta es muy baja y no está interconectada. Los poros identificados se encuentran situados de manera aleatoria a lo largo de la muestra, lo que sugiere una distribución irregular y dispersa de las cavidades. Esta falta de interconexión entre los poros sugiere que la muestra no presenta una red porosa continua que pudiera permitir el flujo de fluidos de manera eficiente.

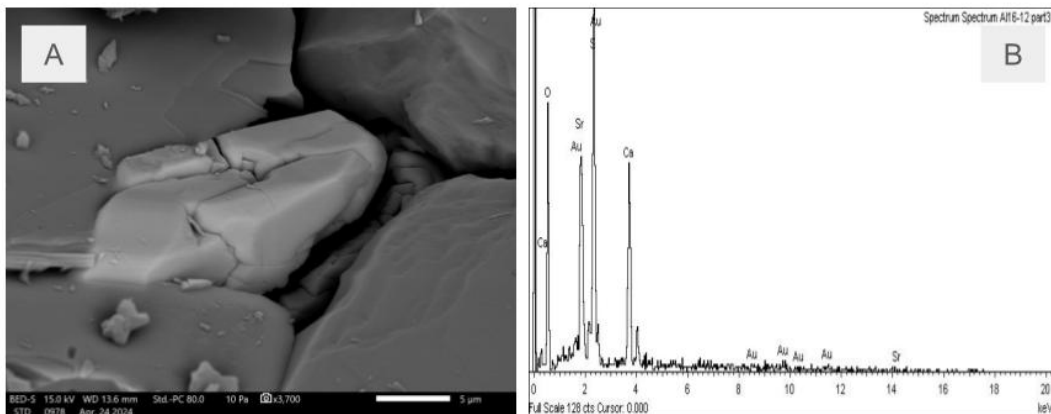


Figura 16. A) Cristal de celestina que se observa en la muestra. Se puede observar también porosidad no conectada B) Gráfico con elementos químicos de la celestina.

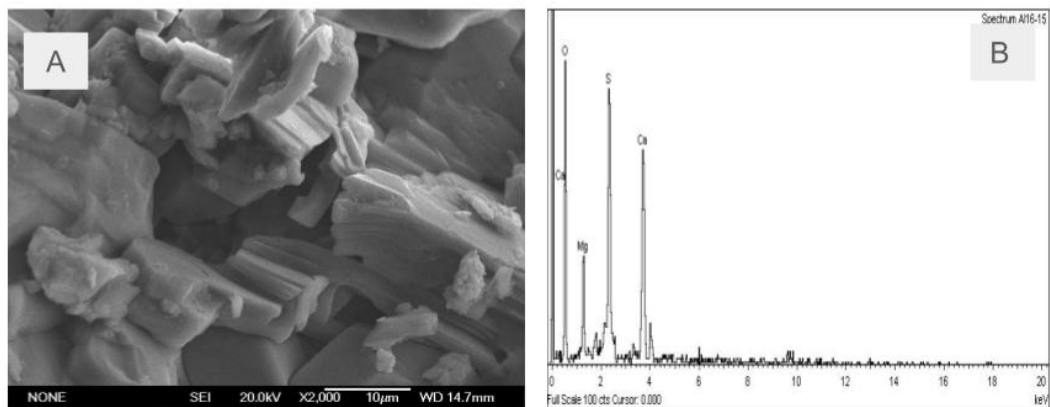


Figura 17. A) Cristales de yeso donde se puede observar porosidad no conectada. B) Gráfico con los elementos químicos que componen los cristales de yeso.

## 4.5 Discusión

El almacenamiento de hidrógeno es una tecnología clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Entre las diversas estrategias de almacenamiento, una de las consideraciones críticas es la contención efectiva del hidrógeno para evitar fugas y asegurar la integridad del sistema (Bailera *et al.* 2017). En este contexto, los yesos, compuestos predominantemente por sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), han surgido como una potencial solución debido a sus propiedades físicas y químicas que pueden ser adecuadas para actuar como sellos en sistemas de almacenamiento de hidrógeno (Kruck & Crotogino 2010)

En este trabajo, se han realizado diversos análisis para evaluar la viabilidad de los yesos como almacén o sellos en el almacenamiento de hidrógeno. Los métodos empleados incluyen análisis de campo, microscopía óptica, ensayos petrofísicos de absorción y desorción del agua, estudios de permeabilidad y el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM) para determinar la porosidad y permeabilidad de los yesos. Se ha determinado que como almacén podrían utilizarse carbonatos de la parte inferior de la unidad estudiada (Unidad Salina), ya que los yesos no presentan sistemas porales con permeabilidad que permitan la circulación de fluidos o gases. De esta forma, el objetivo principal de este estudio ha sido determinar si estos materiales yesíferos tendrían potencial como sello para un almacén de hidrógeno.

Para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno, es esencial contar con sellos que impidan la fuga del gas. Los sellos eficaces suelen ser capas impermeables de roca que evitan el movimiento del hidrógeno como por ejemplo serían:

1) Las arcillas o lutitas son rocas muy impermeables debido a su baja porosidad y alta capacidad de retención de fluidos. Funcionan como sellos efectivos porque evitan la migración del hidrógeno gracias a su estructura densa (González *et al.*, 2011)

2) Evaporitas son extremadamente impermeables y tienen una alta capacidad de deformación plástica, lo que la hace ideal para sellar cavernas. Además de ser buen sello, las evaporitas como la halita se utilizan como material de almacenamiento en cavernas salinas debido a su capacidad para formar cavernas estables (Murray & Renault, 2014).

3) La anhidrita se encuentra frecuentemente asociada con depósitos de sal y puede funcionar tanto como sello como parte del almacenamiento en sí (Malachowskan *et al.*, 2022)

Como posibles almacenes de hidrógeno se encuentran diferentes formaciones de roca como los acuíferos profundos, los reservorios agotados, formaciones de areniscas, calizas y dolomías, vetas de carbón y por último las cavernas de sal (Muhammed *et al.* 2022).

Hay estudios que establecen la localización espacial de áreas con buena capacidad de almacenamiento de hidrógeno, en función de la localización de distintas variables, incluyendo potenciales sellos. En este trabajo se han caracterizado los yesos del Mioceno de la Cuenca de Madrid y según su distribución en la Península Ibérica (Escavy, et al., 2012), en estas zonas existiría la posibilidad de que haya un buen sello, aunque habría que analizar bien las formaciones de debajo para ver si existen también posibles almacenes.

La capacidad de las evaporitas para fluir y sellar cualquier fractura que pueda desarrollarse no solo es una mejora en la seguridad del almacenamiento, sino que también proporciona una barrera adicional contra posibles fugas.

El yeso es químicamente estable con el hidrógeno, lo que significa que no reacciona con el gas almacenado. Esta estabilidad química reduce los riesgos de corrosión y otros problemas químicos que podrían comprometer la integridad del almacenamiento.

Las formaciones de yeso en la región de la Cuenca del Tajo-Mancha (Fig. 18) presentan un gran potencial como sellos naturales para el almacenamiento de hidrógeno. Esta unidad evaporítica, que se encuentra sobre las últimas plataformas marinas carbonatadas está localizada en el noroeste de la cuenca del Tajo. La secuencia geológica en esta área está compuesta por yeso masivo y yeso fibroso de colores blanco, negro y rojizo, intercalado con margas y arcillas (Escavy *et al.*, 2012).

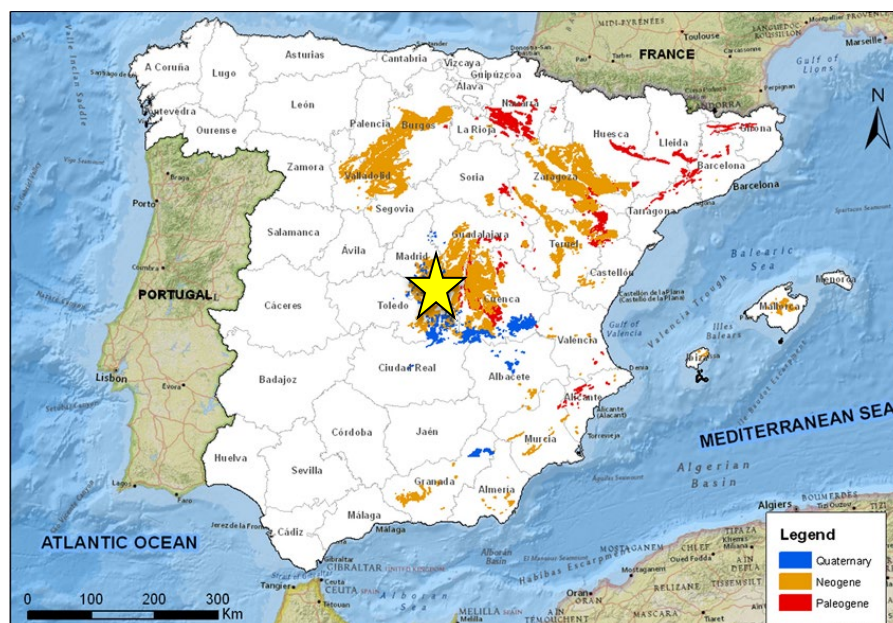


Figura 18. Localización de las unidades de yeso del Cenozoico que afloran en España (Escavy et al., 2012). La estrella indica la localización de la zona de estudio.

Las capas de yeso pueden tener hasta 90 metros de espesor, presentan facies laminadas, nodulares y facies masivas, actualmente este yeso se extrae en varias canteras, principalmente para la producción de yeso industrial (Escavy, *et al.*, 2012), pero en un futuro podría ser un potencial sello para el almacenamiento de hidrógeno en esta zona.

Para evaluar la factibilidad de estos yesos como sellos se han llevado a cabo ensayos de absorción y desorción de agua para determinar la porosidad de los yesos, y los resultados han mostrado que poseen una porosidad extremadamente baja. La absorción del agua y la absorción del hidrógeno son procesos similares en los que moléculas de agua o hidrógeno se adhieren a la superficie de un material sólido. Ambos fenómenos implican la atracción de moléculas a la superficie del material debido a fuerzas intermoleculares, como enlaces de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals. Sin embargo, la absorción de agua tiende a ser más fuerte y compleja debido a la polaridad de la molécula de agua y su capacidad para formar enlaces de hidrógeno, lo que puede influir en la absorción de hidrógeno en presencia del agua. En este caso la absorción del agua siendo más fuerte que la absorción del hidrógeno implica que los datos obtenidos durante el ensayo de absorción y desorción de agua son mayores que los que se obtendría si se hiciera solamente de hidrógeno.

Este ensayo es crucial porque la baja porosidad es un indicador de que el yeso puede actuar como una barrera efectiva para la migración de gases. El ensayo de permeabilidad nos ha proporcionado datos que indican que los yesos son prácticamente impermeables al aire, y por lo tanto a gases. Esta baja permeabilidad es esencial para garantizar que el hidrógeno almacenado no escape a través del sello de yeso.

En la Unidad Inferior, las láminas AL-1, AL-3 Y AL-5 revelan una matriz micrítica y yesos que se alinean con la descripción del campo.

Las velocidades de propagación de ondas P y la anisotropía ofrecen una visión crítica de la estructura interna y la homogeneidad de las muestras. Las muestras AL-1 y AL-3, muestran velocidades de propagación de ondas P de 1719 m/s y 2170 m/s, respectivamente y presentan anisotropías significativas. AL-1 tiene una anisotropía de un 20%. AL-3, aunque tiene una velocidad de propagación superior a AL-1, presenta anisotropía en todas las direcciones. Esta anisotropía multidireccional sugiere una estructura más heterogénea, con mayor porosidad. Los datos de absorción de agua reflejan directamente la porosidad y la densidad de las muestras. Las muestras AL-3 y AL-5 presentan altos coeficientes de absorción de agua (7-11%), lo que está correlacionado con su alta porosidad.

En cambio, las muestras AL-6 y AL-16, con velocidades de propagación de hasta 5975 m/s, presentan baja anisotropía (aproximadamente 5%). Estas velocidades elevadas y la baja anisotropía indican una estructura interna más homogénea y densa, con menor porosidad, que son factores cruciales para un buen material de sellado.

Además, AL-6 y AL-16, con baja porosidad muestran una capacidad de absorción de agua mucho menor (1-1.5%). Esta baja absorción está en línea con su estructura más densa y menos porosa, lo que es ideal para aplicaciones como sellado, ya que minimiza la posibilidad de fugas.

Los resultados de absorción muestran que todas las muestras perdieron el agua absorbida tras 24 horas, con una pérdida de material en varias muestras. La estabilidad estructural bajo condiciones de almacenamiento debe ser investigada más a fondo, ya que la muestra AL-5 presenta características óptimas para ser un buen almacén de hidrógeno.

La permeabilidad al aire también refuerza los resultados obtenidos con las otras técnicas: AL-1, con su estructura anisotrópica y presencia de porosidad, permite el paso del aire, reflejando una cierta permeabilidad. Por otro lado, AL-3, con una estructura un poco más densa, tiene permeabilidad al aire pero baja. Las muestras AL-5, AL-6 y AL-16, al ser impermeables, refuerzan la idea de una estructura densa y sin porosidad significativa, consistente con su baja absorción de agua y altas velocidades de propagación.

Por su parte, el análisis del SEM revela que la porosidad de la muestra AL-16 es aislada y no interconectada, lo que se alinea con la baja permeabilidad y absorción de agua observadas en esta muestra.

La muestra AL-16, con su baja porosidad, baja absorción de agua y alta velocidad de propagación de ondas P, es ideal como material de sellado para el almacenamiento de hidrógeno (Tabla 6). Su estructura densa y homogénea asegura una barrera eficaz contra fugas, proporcionando una solución robusta para aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno.

Por otro lado, la muestra AL-5, tiene alta porosidad y capacidad de absorción de agua, presenta un potencial para el almacenamiento de hidrógeno, pero se requiere una investigación más profunda para evaluar su estabilidad y capacidad de retención a largo plazo. Su estructura porosa sugiere que podría albergar gas, pero la estabilidad bajo condiciones de almacenamiento debe ser confirmada.

El uso del yeso como sello en sistemas de almacenamiento de hidrógeno se basa en su capacidad para actuar como una barrera impermeable. En un contexto geológico, el yeso puede formar capas impermeables que sellan formaciones subyacentes más porosas y permeables, como areniscas o dolomías. Esto es crucial para prevenir la migración del hidrógeno y asegurar que se mantenga contenido dentro de la formación de almacenamiento.

Tabla 6: Principales resultados de los ensayos para determinar las propiedades físicas de todas las muestras.

Propiedades Físicas/Muestras	AL 1	AL 3	AL 5	AL 6	AL 16
Densidad real (kg/m <sup>3</sup> )	2283	2551	2565	2323	2213
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2093	2012	2075	2275	2210,5
Porosidad total (%)	8,32	21,12	19,24	2,06	0,10
Porosidad abierta (%)	8,14	20,96	19,08	1,87	0,09
Porosidad atrapada (%)	0,184	0,158	0,162	0,196	0,10
Compacidad (1-0)	0,92	0,79	0,81	0,98	0,99
Saturación (%)	3,88	10,41	9,38	0,82	0,04
Coefficiente de absorción de agua (%)	3,62	9,91	9,04	1,13	0,13
Permeabilidad al aire (mD)	95,21	26,19	12,32	2,85	3,02
Propagación ultrasónica (m/s)	1719	2507	3410	3926	5960
Anisotropía total (dM %)	21,63	31,78	-	2,74	2,47
Anisotropía relativa (dm %)	3,41	19,7	-	2,4	2,63

La combinación de baja porosidad, baja permeabilidad y los datos detallados obtenidos de la microscopía óptica y SEM confirma que los yesos de la Cuenca del Tajo son excelentes sellos naturales para el almacenamiento de hidrógeno. La estabilidad geomecánica de las capas gruesas de yeso, juntos con sus propiedades petrofísicas, ofrece una solución segura y eficiente para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno a largo plazo, proporcionando una solución viable para las futuras necesidades energéticas y contribuyendo a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

## 5. CONCLUSIONES

El almacenamiento de hidrógeno es fundamental para la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este estudio, se han evaluado diversas muestras de yeso para determinar su viabilidad como sellos en sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

El estudio interdisciplinar con campo, petrografía y petrofísica ha permitido establecer una metodología de caracterización de materiales geológicos para demostrar su interés para el almacenamiento de hidrógeno o bien de su capacidad como sello.

Los resultados indican que la muestra AL-16, que pertenece en la Unidad intermedia, formada por yeso secundario transformado a partir de anhidrita con la presencia de cristales de yeso interdigitados, presenta baja porosidad, baja absorción de agua y alta velocidad de propagación de ondas P, y es ideal como material de sellado. Su estructura densa y homogénea asegura una barrera eficaz contra fugas, proporcionando una solución para el almacenamiento de hidrógeno.

Por otro lado, la muestra AL-5, roca carbonática que presenta una matriz micrítica con presencia de lentículas de yeso que han sido reemplazadas por carbonato, y localizada en la parte superior de la Unidad intermedia, y que representan facies de la zona más profunda (o con más agua) del lago, presenta mayor porosidad y capacidad de absorción de agua, de forma que presenta un potencial significativo para el almacenamiento de hidrógeno. Sin embargo, se requiere una investigación más profunda para evaluar su estabilidad y capacidad de retención a largo plazo. Su estructura porosa sugiere que podría albergar gas, pero es crucial confirmar su estabilidad bajo condiciones de almacenamiento. Además, para ser un buen almacén debería cumplir con otras características geológicas para albergar gas como podría ser encontrarse en una antiforma o control estructural que permitiera la formación de una trampa. Habría que estudiar muestras de ambientes similares al representado por los carbonatos con pseudomorfos de yesos que presenten yesos secundarios en unidades superiores que hagan de sello.

En conclusión, la muestra AL-16, es adecuada como sello de almacenamiento de hidrógeno debido a sus propiedades petrofísicas superiores, mientras que la muestra AL-5 tiene potencial como almacén, pero necesita estudios adicionales para garantizar su eficacia y estabilidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Bailera, M., Lisbona, M., Romeo, L.M., Espatolero, S. (2017) "Power to Gas projects review: Lab, pilot and demi plants for storin renewable energy and CO2." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 292-312.
- Ball, M., Weeda, M. (2015) "The hydrogen economy-Vision or reality?" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 7903-7919.
- Calvo, J.P., García del Cura, M.A., Ordoñez, S., Hoyos, M., Alonso-Zarza. A.M., Sanz, E., Rodríguez Aranda, JP. (1989) "Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid." *Acta Geológica Hispánica*, pp. 281-298.
- Carden, P., and L. Paterson. (1979) "Physical chemical and energy aspects of underground hydrogen storage." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 4, no. 6, pp. 559-569.
- Crabtree, G.W., Dresselhaus M.S., Buchanan, M.V. (2004) "The hydrogen economy." *Physics Today*, vol. 57, no. 12, pp. 39-44.
- Dincer, I. (2012) "Green Methods for Hydrogen Production." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954-1971.
- Escavy, J.E., Herrero, M.J., Arribas, M.E. (2012) "Gypsum resources of Spain: Temporal and spatial distribution". *Ore Geology Reviews* 49, 72-84.
- Escavy, J.I., Herrero, M.J. (2019). "Enterolithic folds in evaporites as microbially induced sedimentary structures: New model of formation and interpretation in the geological record". *Sedimentology*, 66, 2214-2223.
- Fort, R., Fernández-Revuelta, B., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M., Taborda, M. (2008) "Effect of anisotropy on Madrid-region Cretaceous dolostone durability in salt crystallization processes". *Materiales de Construcción*. vol. 58, pp. 289-290.
- Fort, R., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M., Martin-Freire, D., (2011). "Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone". *Journal of Geophysics and Engineering*. vol. 8, pp. 132-144.
- Garcia del Cura, M.A., Ordoñez, S., Calvo, J.P. (1986) "La unidad salina (Mioceno) en el are de Madrid. Características petrológicas y mineralógicas." *Boletín Sociedad Española de Mineralgía*. pp. 329-338.
- Gómez-Márfil, A., Varas-Muriel, M.LM. (2023) "Demand Gold sandstone (Burgos): effect of consolidation an ageing test on its petrographic and petrophysical properties". *Mater. Construcc.* vol. 73 (349).
- González, J. A., Fernández, A. J., Fernández, M. (2011). "Characterization of the clayey formations in Spain for their use as geological barriers in the disposal of radioactive waste." *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 102 (7), pp .689-702.
- Guydader, J., Denis, A. (1986) "Propagation des ondes dans les roches anisotropies sous contrainte évaluation de la qualité de schistes ardoisiers" *Bull. Eng. Geol.* vol. 33, pp. 49-55.

Heinemann, N., Alcalde, J., Miodic, J.M., Hangz, S.J., Kalmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Haseldonckx, E. (2021). "Enabling large-scale hydrogen storage in porous media - the scientific challenges." *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 2, pp. 853-864.

Herrero, M.J., Escavy, J.I., Schreiber, B.C., (2015) "Thenardite after mirabilite deposits as a cool climate indicator in the geological record: Miocene of central Spain". *Climate of the Past*, vol. 11, pp. 1-13.

Kruck, O., Crotonino, F. (2010) "Large-scale hydrogen underground storage for securing future energy supplies. In Compendium of Hydrogen Energy." *18th World Hydrogen Energy Conference 2010*, Detlef Stolten, pp. 78-103,

Kus, J., Meyer, R. (2017) "Hydrogen storage in coal." *International Journal of Coal Science Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 24-28.

Lord, A.S., Kobos, P.H., Borns, D.J. (2014) "Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 28, p.15570-15582.

Malachowska, A., Lukasil, N., Miluska, J., Gebicki, J. (2022) "Hydrogen Storage in Geological Formations-The Potential of Salt caverns" *Energies*, vol. 15, no 14, pp. 5038.

Martínez del Olmo, W. (2021). "Hydrogen Underground Storage: A Key Element for a Future Hydrogen Economy." *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 27912-27929.

Mazloomi, K., Gomes, C., (2012) "Hydrogen as an Energy Carrier: Prospects and Challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3024-3033.

Mediavilla López, R., Portero García, J.M., Sanz Montero, M.E., Rodríguez Aranda, J.P. (2001) *Mapa Geológico de España*, hoja 605 Aranjuez, pp. 11-26.

Muhammed, N.S., Haq, B., Al Shehri D., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E. (2022) "A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook." *Energy reports*, vol. 8, pp. 461-499.

Murray, R. C., Renaut, R. W. (2014). "Salt deposits as reservoirs for hydrocarbons and their role in geological storage of carbon dioxide." *Geological Society, London, Special Publications*, 439(1), 93-112.

NORMAL 7/81 (1981). "Assorimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione". Doc., CNR-ICR. Roma.

Panfilov, M. (2010) "Underground and pipeline hydrogen storage." *In Compendium of Hydrogen Energy*, Ed. Gupta R.B., Elsevier, Chapter 4, p. 73-102.

Ortí, F. (2000) "Unidades glauberíticas del Terciario ibérico: nuevas aportaciones". *Rev. Soc. Geol. España*, vol. 13, no. 2, pp. 227-249.

Qusay, H., Itimad, D.J., Aws, Z.S., Hayder, M.S., (2023) "Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges." *Sustainability* 15, 11501.

Ridgen, J.S. (2002). "Hydrogen. The essential element". *Harvard University Press*, 30 pp. 280.

R.I.L.E.M. (1980): "Essais recommandés pour mesurer l'alteration des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement". *Matériaux et Constructions*, 13,75: 175-253.

Schreiber, B.C., El Tabakh, M. (2000) "Deposition and early alteration of evaporites". *Sedimentology*, vol. 47, pp. 215–238.

Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P.E., Ekins, P., Shah, N., Ward, K.R. (2019) "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system". *Energy Environ. Science*, 12, 463-491.

Tarkowski, R. (2019) "Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 86-94.

UNE-EN 13755 (2008). "Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.

UNE-EN 14579 (2005) "Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.

UNE-EN 1936 (2007). "Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.