



ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN ESPAÑA

Hydrogen storage in Spain

Wenceslao Martínez del Olmo

San Ramón Nonato 1, 2ªA, 28046 Madrid. wmartinezo@ya.com

Abstract: *The Spanish storage of green or grey hydrogen in gas phase is understood to be of primary interest because their use as a clean fuel in the immediate future, as it is considered essential for the reduction of climate change. In numerous media notes it is perceived that there are dozens of green megawatt generation projects to carry out the necessary hydrolysis for its production. However, very few, if any, deals with how to manage its storage and distribution throughout the national territory, and it is believed that the time has come to address this problem, which we try to summarize in: (a) best-known places for underground storage, (b) known or probable capacity of geological warehouses, (c) proximity to the network of gas pipelines that allow their transport from production to consumption areas, (d) possibility of switching existing natural gas storages to hydrogen ones. Taking into account these conditions, nine possible geological traps for hydrogen storage are proposed in this work. Finally, given the difference in costs between green and grey hydrogen, it is questioned whether it is possible to give up the latter.*

Keywords: *Grey and green hydrogen, geological traps storage, Spain.*

Resumen: *El almacenamiento en España del hidrógeno verde o gris en fase gas, se entiende de interés primordial por su utilización como combustible en un futuro inmediato, ya que su uso es considerado imprescindible para la aminoración del cambio climático. En numerosas notas mediáticas se percibe que existen decenas de proyectos de generación de megavatios verdes con los que realizar la necesaria hidrólisis para su producción. Sin embargo, muy pocos, por no decir ninguno, se ocupa de cómo gestionar su almacenamiento y distribución por el territorio nacional, problemática, que tratamos de compendiar en: (a) lugares mejor conocidos para su almacenamiento en el subsuelo, (b) capacidad conocida o probable de los almacenes geológicos, (c) proximidad a la red de gasoductos que permitan su transporte desde los centros de producción hasta los de consumo, (d) posibilidad de cambiar a hidrógeno los almacenamientos de gas natural existentes. Teniendo en cuenta estos condicionantes, en este trabajo se proponen nueve posibles trampas geológicas para el almacenamiento de hidrógeno. Por último, dada la diferencia de costes entre el hidrógeno verde y el gris, se plantea, si es posible renunciar definitivamente al último.*

Palabras clave: *Hidrógeno gris y verde, almacenamiento en trampas geológicas, España.*

Martínez del Olmo, W., 2021. Almacenamiento de hidrógeno en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 34 (2): 53-59.

Introducción

En la lucha contra el cambio climático se avanza tan decididamente que, en un tiempo record, se ha pasado de buscar trampas geológicas profundas donde secuestrar el CO₂ (Martínez del Olmo, 2007a, b, 2008; Zapatero y Martínez del Olmo, 2008; IGME, 2009; Motis *et al.*, 2012; Martínez del Olmo, 2015, 2018, 2019) a establecer la necesidad de revisar las más apropiadas de aquellas que nuestro territorio ofrece para almacenar el prometedor combustible del futuro, combustible que no es otro que el hidrógeno, ya sea verde por ser obtenido por hidrólisis desde electricidad renovable o el llamado gris porque provenga de combustible fósil, entre los que por su disponibilidad, precio y limpieza sobresale el gas natural.

Su valía como combustible radica en que su combustión no genera gases de efecto invernadero (CO y CO₂) sino simplemente agua en forma de vapor, motivo por el que se le reconoce como un combustible respetuoso con el medio ambiente, de ahí que su uso generalizado sea la mejor ayuda que hoy se postula para mitigar-combatir el cambio climático, que tanto preocupa a numerosas instituciones de reconocido prestigio.

Describir y caracterizar la localización de los almacenes geológicos es el objeto primordial de este trabajo, pero antes de entrar en ello es necesario mostrar las fortalezas y debilidades que ambos almacenamientos, carbónico e hidrógeno diferencian:

- El almacenamiento del CO₂ se planteó en una sola dirección, conocida como secuestro a perpetuidad, lo que en este dinámico planeta es posiblemente una utopía o riesgo a correr. El H₂ debe ser almacenado en trampas geológicas, tipo cavidades salinas y formaciones porosas que contengan o contuvieron hidrocarburos (Heineman *et al.*, 2021) y que permitan su recuperación a los ritmos adecuados a las necesidades energéticas.

- El CO₂ es corrosivo, por lo que no puede ser transportado por la red de gasoductos actualmente en uso. El H₂ no lo es y puede ser transportado por la red nacional de gasoductos, permitiendo hasta un 20% de mezclas con el metano. Dato que permite pensar en realizar almacenes para H₂ y CH₄ en la misma trampa.

- El CO₂ disminuye enormemente su volumen cuando alcanza el estado crítico en las trampas geológicas profundas. En dichas trampas y en almacenes con aguas saladas, el H₂ en estado gaseoso ocupa un 30% más de volumen poroso que el CO₂ (Heinemann *et al.*, 2021).

Este último aspecto sería un importante inconveniente para el almacenamiento del H₂ verde o gris, para el caso de que la Geología de España no proporcionase numerosas oportunidades de almacenamiento en las trampas posibles: almacenes de CO₂, yacimientos de metano o petróleo agotados, chimeneas salinas, formaciones porosas bajo sellos confiables, y las posibles necesitadas de una mejor definición geológica del almacén y el sello, y ante todo de la fiabilidad del cierre de la trampa.

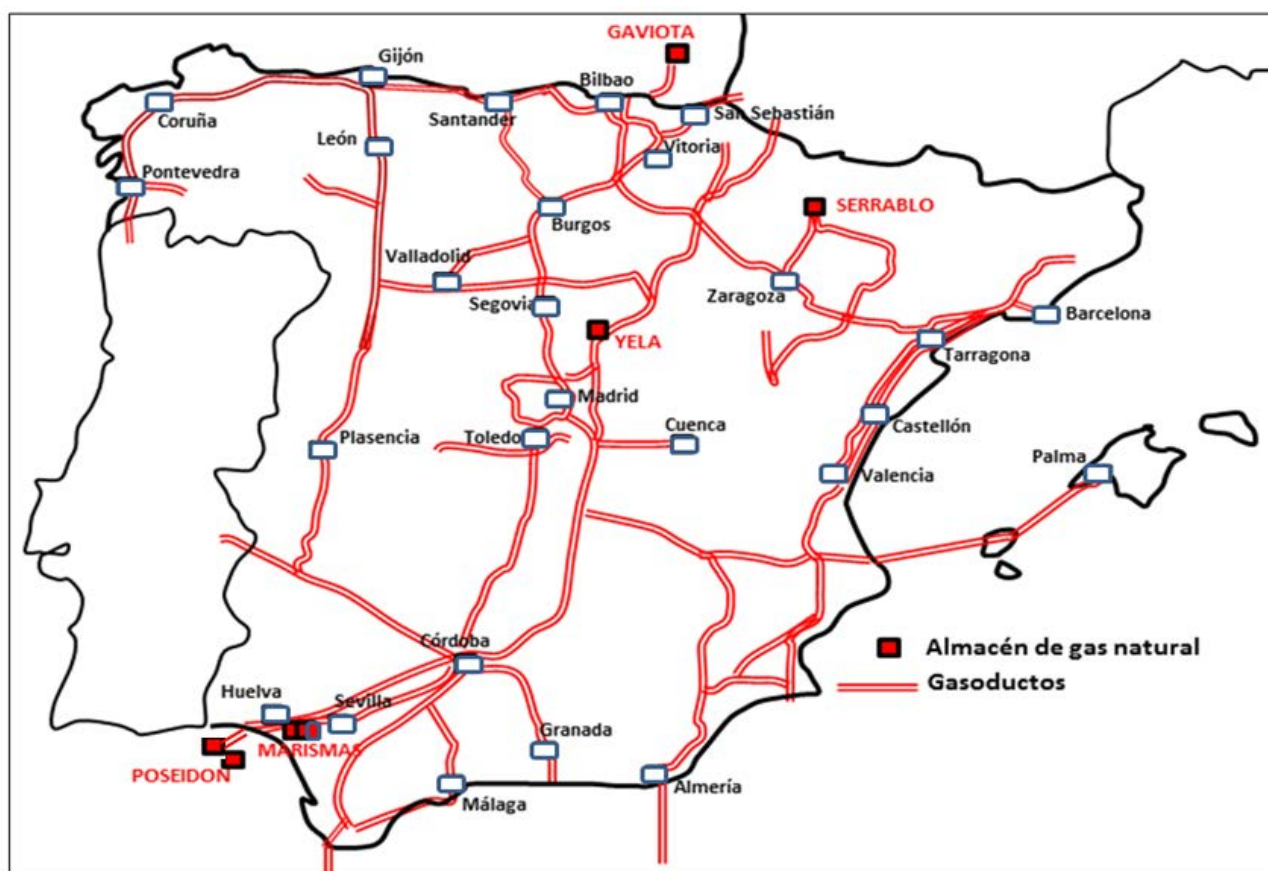


Fig. 1.- Red de gasoductos que puede ser utilizada para el transporte del hidrógeno en fase gas, y señalización de los almacenes de gas natural con estanqueidad probada y capacidad conocida.

Secuestro del CO₂: capacidad conocida y probable

Se adelantó en la introducción que el H₂ en fase gas y el CO₂ pueden ser almacenados en trampas geológicas, por ello conviene revisar lo que conocemos para el caso del CO₂. En el año 2009 el IGME, mediante el estudio ALGECO2 (Almacenes Geológicos de CO₂) realizó una revisión de aquellas trampas geológicas profundas que podrían al-

bergar el CO₂ porque, en aquel momento, su secuestro a perpetuidad constituía el objetivo primordial de la comunidad geológica.

El programa ALGECO2 solo se dedicó al dominio emergido (Fig. 2), obviando posibilidades contrastadas existentes en las aguas jurisdiccionales y las posibilidades derivadas de las chimeneas y capas salinas. Estas posibilidades que, aunque sea muy resumidamente, trataremos de

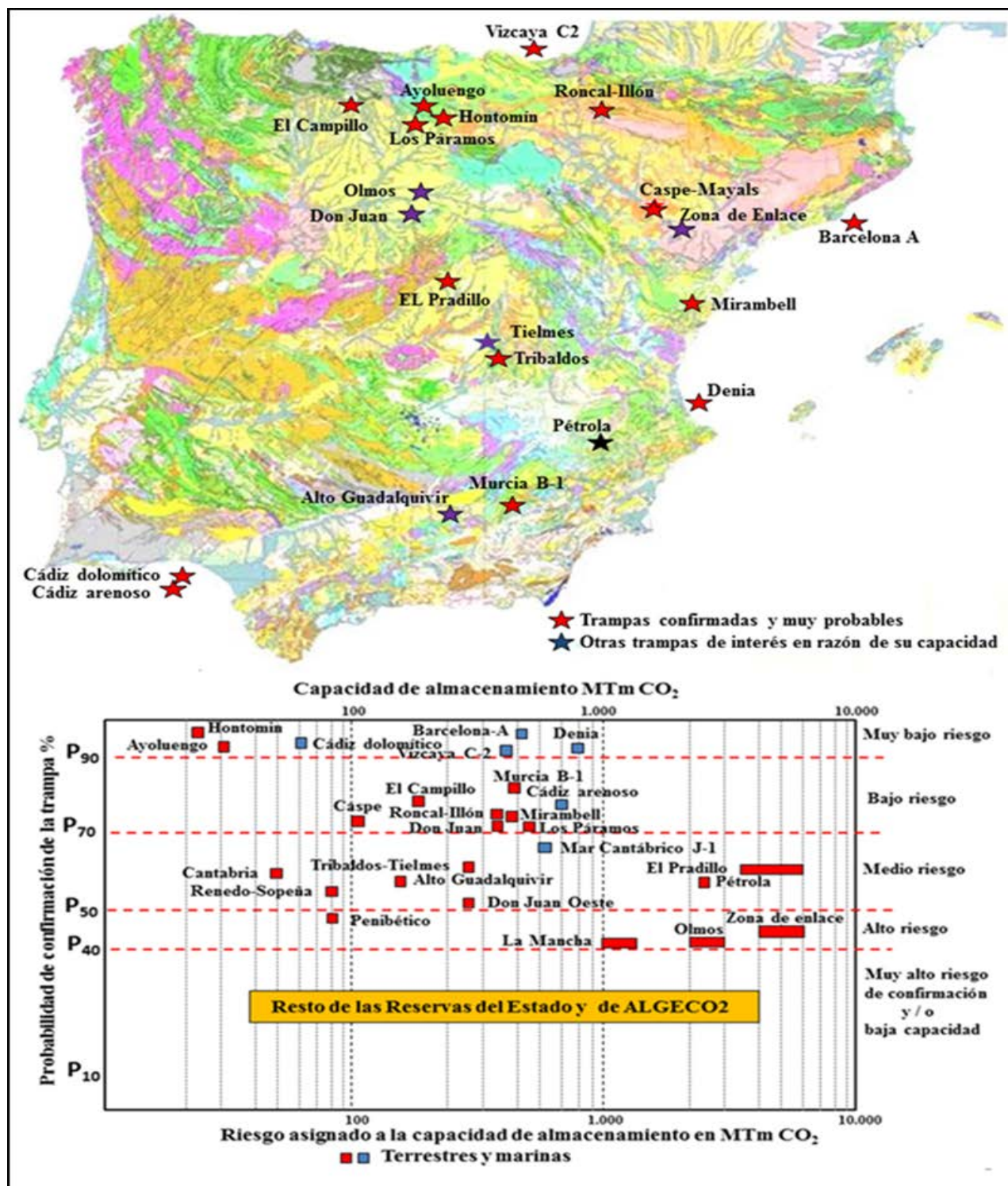


Fig. 2.- Distribución de las trampas que ALGECO2 consideró confirmadas o muy probables, y diagrama mostrando su probabilidad de existencia, capacidad y riesgo de confirmación. Las capacidades han de ser reducidas en un 30% porque están expresadas para el almacenamiento del CO₂.

completar en este trabajo, sin olvidar los aspectos logísticos y económicos que sobre ellas recaen y que, posiblemente, las hacen poco atractivas para el almacenamiento del hidrógeno, ya que las cifras alcanzadas, sin su concurso, se consideran suficientes para una primera fase de evaluación de las posibilidades de almacenamiento del hidrógeno en fase gas.

ALGECO2 estudió 145 trampas posibles y llegó a recomendar programas de definición geológica y estructural a un total de 25 de ellas, a las que otorgó una probabilidad de existencia del 70% y una capacidad teórica, mínima y máxima, de 5.600 y 14.000 millones de toneladas (MTm), respectivamente. Dado que el hidrógeno en estado gas ocupa un volumen poroso un 30% mayor del que ocuparía el CO₂, quedarían unas capacidades de almacenamiento de entre 4.000 y 10.000 MTm, respectivamente. Estas cifras sugieren que, en principio, las trampas geológicas de la España terrestre merecen una atención y quizás revisión de sus posibilidades, tanto en cuanto a su capacidad como a la confianza que se asigne a su existencia. Dicha revisión debería ser realizada por Instituciones Públicas, para así asegurar que las ayudas económicas, que pueda dedicar la Unión Europea a este proceso, sean realmente dedicadas al problema planteado.

El problema de las cavidades salinas en España radica en que, hasta donde conocemos, no se han desarrollado, y tan solo los diapiros de La Rosa en Jumilla, Pinoso en Alicante, Polanco en Cantabria y la sales de Suria-Cardona en Cataluña, ofrecen posibilidades reales. Si a ello añadimos la necesidad de evacuar la salmuera sobresaturada para alcanzar una notable capacidad de almacenamiento, tan solo unos pocos de los numerosos (30-40) diapiros que alcanzan la superficie y por ello se visualizan, están próximos al mar (provincias de Alicante y Valencia) y esa proximidad facilitaría la construcción del salmuero-ducto que precisan para evacuarla y no tropezar con dificultades económicas y sociales. A ello, conviene añadir que no incrementarían sustancialmente la capacidad de almacenamiento, si bien, su interés radica en la alta velocidad de almacenamiento y producción del H₂ que este tipo de almacén proporcionaría.

En resumen, la capacidad de almacenamiento debe prevalecer sobre la velocidad-ritmo de inyección y producción, más aún cuando este es fácil de incrementar desde el número de sondeos que alcancen el almacén poroso en las trampas. También, es evidente que asegurar la capacidad de las trampas geológicas propuestas en ALGECO2 o de otras nuevas, es un problema menor, fácil de resolver mediante la adquisición de sísmica 3D sobre superficies del orden de 100-200 km² y 1-2 sondeos de control por trampa.

Proximidad a la red de gasoductos

Dada la red de gasoductos de alta y baja presión que España posee, siempre existe la posibilidad de que alguno de ellos esté a corta distancia de la localización escogida para el almacén de H₂ en estado gas. Además, la inversión que un nuevo y más largo trazado exigiese, no debería frenar el objetivo perseguido, porque la lucha contra el cambio climático así lo demanda.

En resumen, nuestra atención debe focalizarse, no en el transporte, sino en la elección de los lugares idóneos para su almacenamiento. Idoneidad que debe fijarse en su estanqueidad y capacidad, siendo un aspecto secundario su distribución por el territorio nacional.

Sustitución de gas natural por hidrógeno en almacenes geológicos existentes

En el subsuelo de España existen siete almacenes geológicos de gas natural. Tres son marinos (Gaviota y Poseidón Norte y Sur) y cinco terrestres (Serrablo, Yela y Palancares, Rincón y Marismas). Estos almacenes acumulan una no despreciable capacidad, del orden de 3.100 a 3.900 Mm³, que reducidos en un 30% significarían 2.170 a 2.730 Mm³ de capacidad y una seguridad indiscutible, porque algunos llevan funcionando desde hace años.

Junto a estos hechos positivos hay que unir su conexión a la red de gasoductos en servicio y su elevada capacidad de inyección y producción. Por tanto, una de las cuestiones a plantear sería si es posible prescindir de su utilización actual como almacenes de gas natural para ser utilizados como almacenes de hidrógeno.

Adicionalmente, la diferencia de densidad del H₂ y el CH₄ favorece el almacenamiento de ambos gases de forma conjunta, ya que generaría un almacén geológico que tendría un ático o culminación ocupada por el menos denso H₂ que estaría separado del CH₄ por un contacto o plano horizontal, fácil de definir, en estático o en dinámico, mediante sondeos y que permitiría acomodar las exigencias-necesidades energéticas: inyección y producción de uno u otro combustible.

Renuncia al hidrógeno gris

Es evidente que en el proceso de pirolisis para la producción de hidrógeno se proponga que la electricidad proceda de fuentes renovables, favoreciendo así la producción de hidrógeno y el abandono de los combustibles fósiles, aunque en este caso no estemos hablando de otro que no sea el eficiente y limpio gas natural. Sin embargo, el precio de la pirolisis desde las renovables triplica al calculado cuando se realiza desde el gas natural (Heinemann *et al.*, 2021). Diferencia sustancial que implicaría que sin modificaciones económicas notables (reducción del precio del hidrógeno verde) o problemas de abastecimiento en gas natural, renunciar al hidrógeno gris no parece, de momento, una decisión necesaria. Además, y dado que disponemos de una adecuada diversificación de nuestro aprovisionamiento de gas natural (metaneros desde muy diferentes y alejadas procedencias, y gasoductos con el norte de África), renunciar al hidrógeno gris, no parece urgente. A no ser, que suprimir el gas natural para la pirolisis esté pensado en relación al beneficio resultante de reducir nuestras importaciones del mismo, ya que suponen el 99% del que consumimos, y que, sin duda, necesitamos para no atentar contra la paralización de nuestra actividad industrial y doméstica, con la posible y consiguiente destrucción de nuestro actual estado del bienestar.

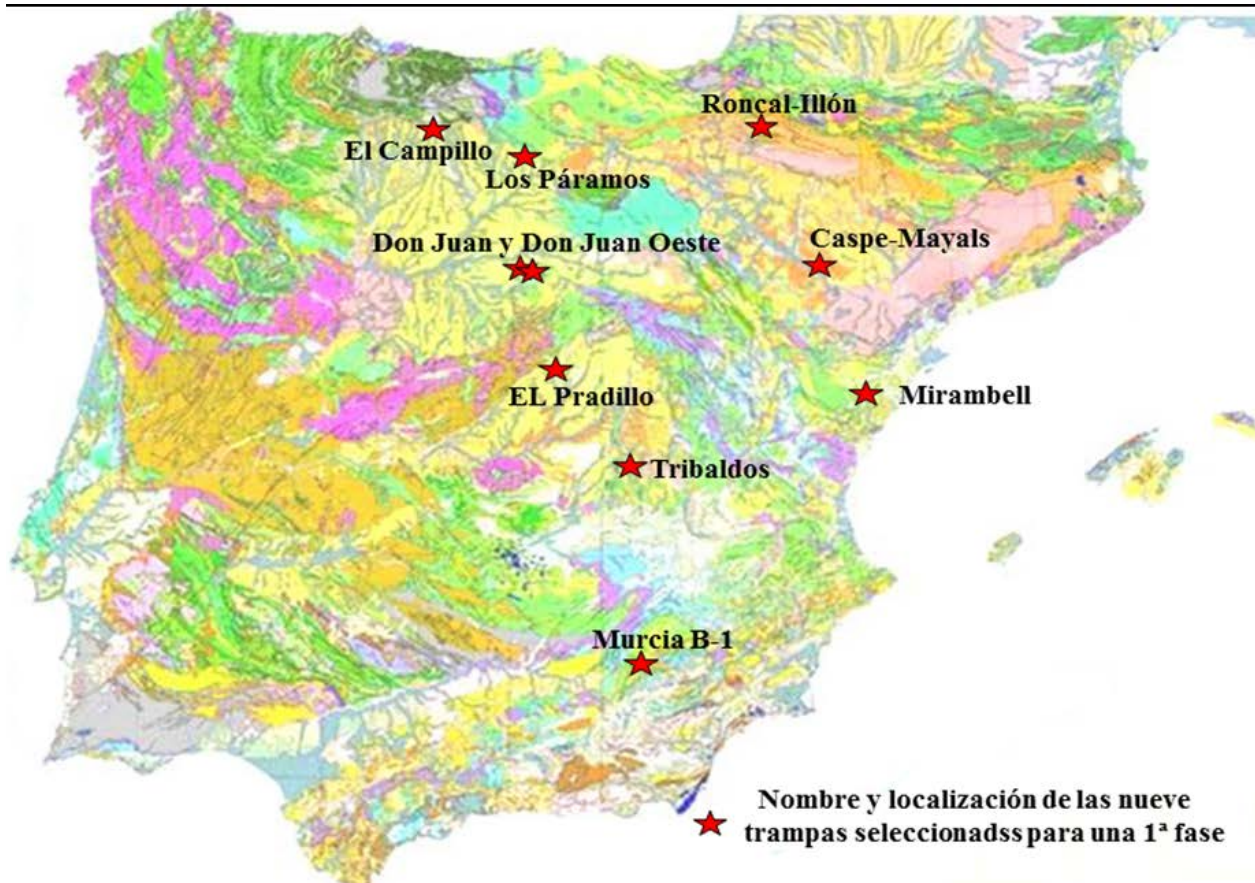
Esta disyuntiva es aún más discutible, cuando conocemos que los dos combustibles, actual y de futuro, es decir, gas natural e hidrógeno, pueden almacenarse en trampas conjuntas e inyectarse-producirse en ellas en función de las necesidades de uno u otro.

Trampas recomendadas para inyectar-almacenar y producir hidrógeno en estado gas

El estudio ALGECO2 propuso una selección de tram-

pas geológicas, tipo monoclinas o anticlinales, que tal y como se ha indicado con anterioridad, servirían tanto para el almacenamiento del hidrógeno como del metano, ya sean, en la misma trampa o en trampas diferentes.

También se ha indicado que, dada la red de gasoductos, su localización sería un motivo secundario, y que debería primar su seguridad. Si atendemos exclusivamente a ella, nos quedaríamos con aquellas trampas que se muestran en la Figura 1 (Gaviota, Serrablo, Yela, Marismas y Poseidón Norte y Sur).



Trampa	Almacén Porosidad %	Almacén Espesor	Sello Espesor	Cierre vertical	Área cerrada km ²	Capacidad MTm de hidrógeno	Probabilidad de existencia de la capacidad indicada
Murcia B-1	8-9	1.200	700	600	> 50	500	80
El Campillo	18-20	80	400	90	25	125	75
Caspe-Mayals	17	200	100	100	80	70	72
Roncal-Illón	5-6	80-90	110	80	500	200	70
Don Juan	7	250	850	100	45	400	65
Mirambell	12-13	150	1.200	180	16	100	65
Los Páramos	14-16	200	500	300	30	250	60
Tribaldos	7-8	50-60	160	75	> 150	125	55
El Pradillo	18-20	250	380	Monoclinas	> 250	2.800	65

De 3.100 a 4.500 Millones de Toneladas de capacidad, sin y con riesgo de confirmación, en las nueve trampas seleccionadas para la 1ª fase del almacenamiento de hidrógeno en fase gas (El espesor del sello indica la profundidad del techo del almacén)

Fig. 3.- Las nueve trampas seleccionadas para la 1ª fase de almacenamiento del hidrógeno realizada en función de su probabilidad de existencia, profundidad y capacidad.

Siendo menos restrictivos en el concepto de seguridad y atendiendo a los datos geológicos y geofísicos que las acreditan, que fueron expresados en ALGECO2, ampliaríamos las posibilidades a las que se indican en la Figura 2, donde las de Ayoluengo, Hontomín, Cádiz dolomítico, Barcelona A, Vizcaya C2, Denia, Murcia B-1, Caspe-Mayals, Cádiz arenoso, El Campillo, Roncal-Illón, Mirambell, Don Juan y Los Páramos, fueron consideradas con una probabilidad de existencia mayor del 70%. En cualquier caso, es importante señalar que en algunos de estos casos habría que considerar el régimen hidrogeológico (por ejemplo, posible presencia de agua dulce en la formación almacén del anticlinal de El Campillo) y la posible porosidad secundaria de algunas formaciones (por ejemplo, en las rocas carbonatadas de Hontomín), que darían lugar a un mayor riesgo de fuga.

Por último, se designan de interés preferente las indicadas en la Figura 3. En ella, se han suprimido las de baja capacidad, las marinas y las más problemáticas de las de tipo monoclinal, porque la confirmación de las suprimidas precisaría campañas sísmicas en 3D de cientos de kilómetros cuadrados. Es importante señalar que con la confirmación de alguna de estas trampas (Fig. 3), como por ejemplo El Pradillo, próximo a Madrid, poco profunda, excelentemente conectada con la red de gasoductos y con una sobresaliente capacidad de almacenamiento de ± 2.800 MTm, se solucionaría el problema del almacenamiento de hidrógeno, en este caso para el área que, en principio, es potencialmente la que más consumiría.

A pesar de esta reducción del número de trampas, éstas acumulan una capacidad considerada suficiente para una primera fase de almacenamiento del hidrógeno verde o

gris, y atienden a conceptos económicos relacionados con su localización (terrestre o marina) y geológicos relacionados con su profundidad, calidad y tipo de almacén (unicapa o multicapa) y sello (litología y espesor), porque todos estos aspectos (Fig. 4) deben tenerse en cuenta para los objetivos perseguidos y para la toma de decisiones.

Discusión y conclusiones

En los párrafos precedentes se ha expresado que el almacenamiento del hidrógeno es, quizás, crucial para la lucha contra el cambio climático, ya que se necesitarían decenas o cientos de puntos donde realizar la hidrólisis, y que fuesen coincidentes o estuvieran conectados a los centros de consumo. Parece evidente que estamos, diríamos, obligados a almacenar hidrógeno en fase gas en España, pues solo así podremos asegurar su deseable uso en años venideros y no depender, una vez más, de su importación desde otros países.

Al no disponer de un estudio específico de sus posibilidades de almacenamiento, en este trabajo se ha recurrido a repasar y revisar aquellas trampas que fueron propuestas para el secuestro del CO₂ en el proyecto ALGECO2. La revisión y propuesta a la que finalmente conduce se ha basado en: a) el riesgo de confirmación del cierre de la trampa geológica, b) la capacidad de la trampa, c) la proximidad a la red de gasoductos que permitan su transporte desde los posibles centros donde se produciría la pirolisis, d) el mantenimiento operativo de los actuales y existentes almacenamientos de gas natural.

Teniendo en cuenta la información anterior y ante la necesidad futura de almacenamiento de hidrógeno, se han

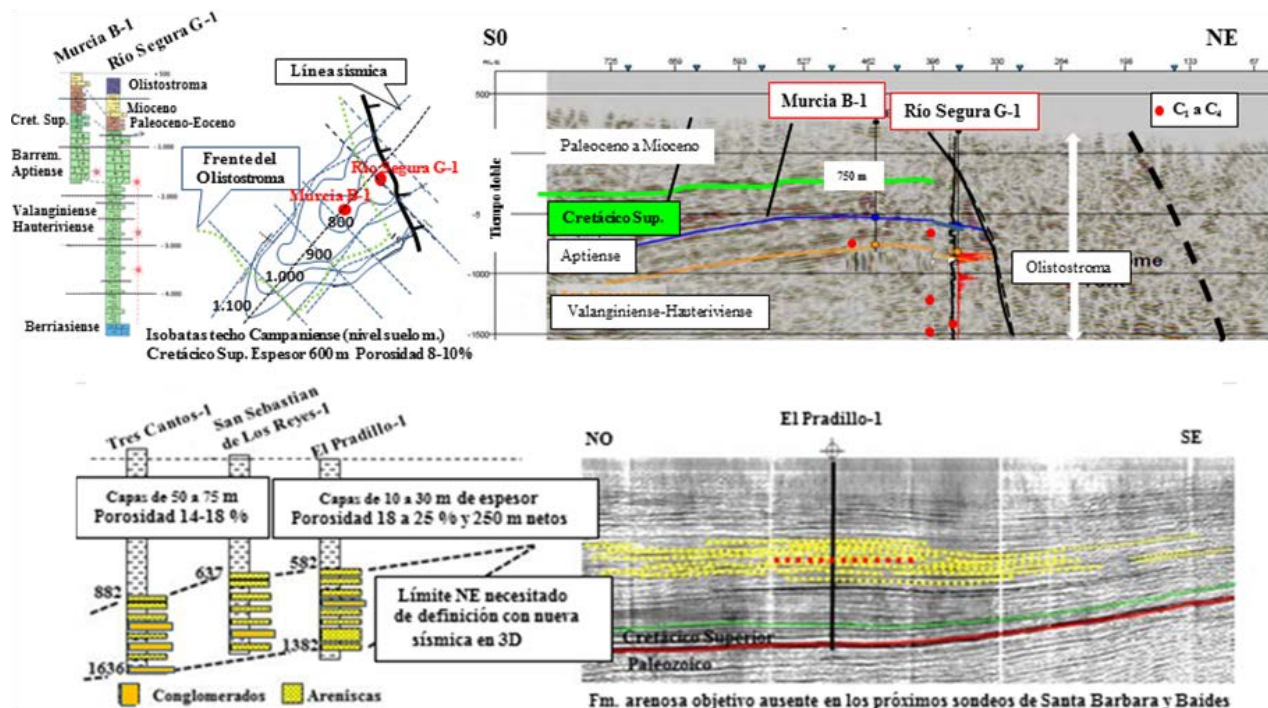


Fig. 4.- Expresión geológica y geofísica de las dos trampas de posible mayor capacidad de las nueve que finalmente han sido propuestas para la considerada urgente, toma de decisiones. Por motivos de espacio y porque pueden ser consultadas en ALGECO2, no se adjuntan ejemplos de las siete restantes.

propuesto nueve trampas geológicas (Fig. 3) que cumplen con los requisitos de: i) alta posibilidad de existencia de su necesaria estanqueidad, ii) pequeños programas de geología (sondeos) y geofísica (líneas sísmicas) para asegurar, si fuese necesario, su estanqueidad y capacidad, iii) una aceptable distribución de las mismas por el territorio peninsular.

Las trampas geológicas seleccionadas tendrían una probabilidad de existencia de entre el 65 y el 80% y podrían conducir a una capacidad cifrada entre 3.100 y 4.500 MTm de hidrógeno en estado gas. De esta propuesta se deduce que nuestros mayores problemas para el almacenamiento de hidrógeno se circunscriben a los archipiélagos de Baleares y Canarias, dos territorios a los que habría que buscar otro tipo de solución, probablemente tipo tanque superficial.

Es evidente que son muchos los datos que nos faltan para realizar una propuesta formal, y entre ellos destaca el que no se han encontrado datos que indique una estimación del consumo de hidrógeno en nuestro país. Por último, dadas las sustanciales diferencias económicas existentes entre la producción del hidrógeno verde y gris, se plantea la difícil renuncia al llamado hidrógeno gris.

Agradecimientos y financiación

A Nieves López-González, editora principal de la Sociedad Geológica de España, al revisor J. Luís García Lobón y a otro revisor anónimo, cuyas observaciones y sugerencias mejoraron el texto del trabajo. La realización del presente estudio no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Referencias

Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J.M., Hangx, S.J.T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, Ch., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E.M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson,

- M., Bentham, M., Haszeldine, R.S., Carbonell, R., Rudloff, A., 2021. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media - the scientific challenges. *Energy & Environmental Science*, 14: 853-864.
- IGME, 2009. Proyecto ALGECO2. <https://info.igme.es/geologiasubsuelo/AlmacenamientoCO2/Algeco2.aspx> (11/12/2021).
- Martínez del Olmo, W., 2007a. *Propuesta de Reservas del Estado para el secuestro del CO₂*. Fundación para Estudios sobre la Energía, Madrid, 47 p.
- Martínez del Olmo, W., 2007b. *Una primera selección-evaluación de lugares geológicos donde inyectar el CO₂*. Repsol Exploración y Fundación para Estudios de la Energía, Madrid, 166 p.
- Martínez del Olmo, W., 2008. Posibles almacenamientos de CO₂ en España. En: *El futuro del carbón en la política energética española*. Fundación para estudios sobre la energía, Madrid, 225-246.
- Martínez del Olmo, W., 2015. *El cambio climático y opciones para aminorarlo*. XVIII Curso de sondeos, Escuela Superior Politécnica de Linares (Jaén), 58 p.
- Martínez del Olmo, W., 2018. Geología, cambio climático y como tratar de aminorarlo. *XIV Congreso Internacional de Recursos Energéticos y Minerales*. Sevilla, 10 p.
- Martínez del Olmo, W., 2019. Cambio climático, acuerdos de París y trampas geológicas donde secuestrar el CO₂ en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 87-106.
- Motis, K., Grandia, F., Credoza, A., Martínez del Olmo, W., 2012. Un área potencial para almacenamiento geológico de CO₂: Los Páramos (Burgos). *VIII Congreso Geológico de España*. Oviedo, 10 p.
- Zapatero, M.A., Martínez del Olmo, W., 2008. Confinamiento del CO₂. En: *El futuro del carbón en la política energética española*. Fundación para estudios sobre la energía, Madrid, 219-225.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 18-07-2021

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 13-10-2021

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 17-12-2021