



## CAMBIO CLIMÁTICO, ACUERDOS DE PARIS Y TRAMPAS GEOLÓGICAS DONDE SECUESTRAR EL CO<sub>2</sub> EN ESPAÑA

*Climate change, Paris accords and geological traps to sequester CO<sub>2</sub> (Spain)*

Wenceslao Martínez del Olmo

*Oil and Gas Capital. s.l. Ángel Muñoz, 3, 28043 Madrid*  
*wmartinez@oilandgascapital.com*

**Abstract:** In 2017 the Spain CO<sub>2</sub> emissions reached the 338.8 Million Tons (MTm), 17,8% higher than the 1990 year of reference. Spain has set a 40% reduction commitment to reach in 2030. This means that from 2030 and subsequent years we must reduce our emissions by 110 MTm/year. There are two ways to achieve the commitment: reduce CO<sub>2</sub> emissions and sequester the CO<sub>2</sub> emitted in geological traps. The first is well known, the second is unknown and therefore we devote greater attention. The exploration of the Spain area has been overdrawn by the low number of exploratory wells per km<sup>2</sup> and by seismic lines having been made with technology of 30-40 years ago. It has led to: 1) That we import the 99.8% of the gas we consume, so changing thermal coal to thermal gas (which would reduce emissions by 60%) would increase our facture for imports of natural gas; 2) Our knowledge of geological sites where injected the CO<sub>2</sub> be overdrawn. In 2009 the ALGECO2 program dealt studying the possibilities of these geological traps and concluded that 103 were possible but in need a major definition and only 13 were already reasonable. As not all possible traps are located where CO<sub>2</sub> emissions are more bulky, can be expressed that combating emissions must be solidarity, which we believe is missing in many institutions that do not facilitate the acquisition of new data (seismic lines and wells) that would allow finalize the evaluation and selection of these traps where kidnap the unavoidable CO<sub>2</sub> produced. The selection of possibilities for ALGECO2, its conclusions, uncertainties and problems, do this work that we completed with the inclusion of the best possibilities of our territorial waters and some other than by its strategic location should be taken into consideration. Finally is necessary to reduce the current \$ 45/Tm of capture because they are much higher than the \$25 of emission rights and many of private emissaries will prefer their pay and whit this option it would be difficult to reduce the CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** Climate change, Spain commitment, CO<sub>2</sub> sequestration.

**Resumen:** En el año 2017 España emitió 338 MTm CO<sub>2</sub>-eq, lo que significa un 17% superior a la del año 1990 (277 MTm). España ha fijado un compromiso de reducción del 40% a alcanzar en el próximo 2030. Ello significa que desde ese año y en los sucesivos, los acuerdos de Paris obligan a reducir nuestras emisiones en 110 MTm/año y debemos hacerlo manteniendo el estado del bienestar y los 253 TWh de nuestro consumo eléctrico. Existen dos caminos para alcanzar tal compromiso: reducir las emisiones y secuestrar lo emitido en trampas geológicas. El primero es bien conocido, al segundo por ser menos mediático dedicamos este trabajo, asumiendo que el cierre de las térmicas de carbón responsables del 65% de nuestras emisiones de CO<sub>2</sub> no sería suficiente porque los ciclos combinados también emiten y ellos son necesarios para salvaguardar las necesidades de consumo eléctrico cuando las energías renovables no alcancen a satisfacerlo. Nuestro conocimiento de las trampas geológicas donde confinar el CO<sub>2</sub> es deficitario porque las líneas sísmicas que soportan su análisis no han sido reinterpretadas tras ser mejoradas por los modernos reprocesados de sus cintas originales. A pesar de ello, una revisión de estos datos nos lleva a proponer a la iniciativa privada o pública un listado de 25 trampas geológicas de bajo y alto riesgo geológico de confirmación y otro de tan solo 13 que por su localización recoge tanto las más fiables como las más próximas a las áreas con grandes emisiones. Por

último se indica la necesidad de reducir el coste actual de 45\$/Tm de captura, pues es muy superior al de los derechos de emisión (25\$/Tm), por lo que si no se reduce, posiblemente no se evitara las emisiones.

**Palabras clave:** Cambio climático, acuerdos de París, secuestro de CO<sub>2</sub>.

Martínez del Olmo, W., 2019. Cambio climático, acuerdos de París y trampas geológicas donde secuestrar el CO<sub>2</sub> en España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 87-106.

## Introducción

En el año 2017 España emitió 338 MTm (millones de toneladas) de CO<sub>2</sub>, un 17% más de lo emitido en 1990 que fue de 277 MTm. Nuestro compromiso con la Unión Europea (París, 2015) ha sido fijado en reducir un 40% las emisiones de ese año 1990, tomado como referencia, es decir llegar al 2030 con unas emisiones totales de 110 MTm. Esto supone reducir las emisiones del 2017 en 228 MTm anuales. Este compromiso y reto debe conseguirse sin que por ello colapsemos el estado del bienestar, que en una primera y simple aproximación podemos cifrar en proporcionar: vivienda digna, desarrollo de la industria, agricultura, sanidad, transporte y generación de electricidad, y conseguirlo cuando las energías renovables, viento, sol y lluvia, no alcancen a satisfacer la demanda de electricidad, ya que esta, por diversos motivos, ascenderá muy notablemente para alimentar el crecimiento de todos los sectores (British Petroleum, 2013; Secretaría Cambio Climático Naciones Unidas, 2016; International Energy Outlook, 2016).

La tarea encomendada no es ni simple ni fácil, y es evidente que hay dos trabajos prioritarios a los que dedicar esfuerzo, capacidades y financiación:

1) Reducir emisiones, cosa que casi todos, desde los medios, conocen como hacerlo, pero a la que en páginas siguientes pondremos algunas cifras que muestran la dimensión del problema.

2) Qué hacer con las emisiones que ineludiblemente, por simples problemas tecnológicos, no podemos dejar de emitir. Este aspecto menos conocido se puede resumir en capturar, transportar e inyectar el CO<sub>2</sub> en trampas geológicas profundas y seguras, pero cuya localización y condiciones solo pueden ser establecidas desde Geología y Geofísica. A esta vía, por ser menos conocida y poder constituir parte de la solución final, dedicaremos una descripción más detallada.

Las líneas precedentes vienen al caso porque si se atiende a los medios, lo único en lo que parecen interesadas nuestras instituciones y organizaciones, es en suprimir la quema del carbón, del petróleo y del gas, y en aumentar el transporte eléctrico y la generación desde las energías renovables, iniciativas sin duda saludables y beneficiosas, pero insuficientes, porque si atendiésemos a la captura y secuestro del CO<sub>2</sub>, podríamos llegar al año 2030 con un práctico cero emitido.

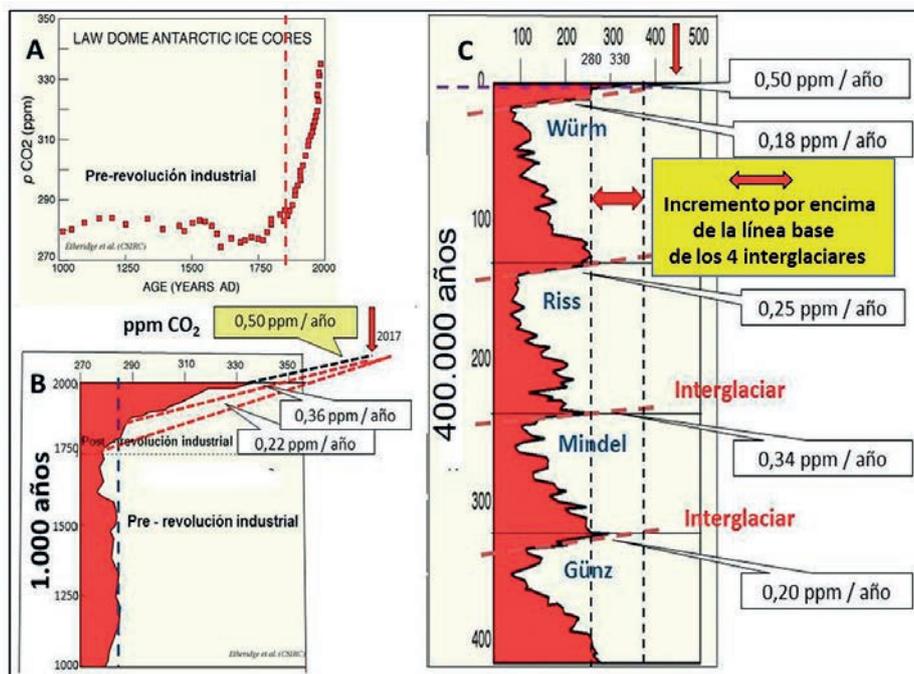
Tal y como anticipado, este trabajo dedica una breve descripción a algo, que por conocido, reducir emisiones sin dañar el estado del bienestar, no le viene mal precisar algunas cifras significativas. Una segunda parte se dedica a

mostrar una interpretación de lo conseguido en el Programa ALGECO2 llevado a cabo por el IGME en el año 2009, y en una tercera, se ofrece una justificación y relación de los que se consideran los posibles mejores lugares, terrestres y marinos, de España donde secuestrar el CO<sub>2</sub>.

## Parte 1. Reducción de emisiones

Desde que en 1978, Ch. D. Keeling consiguió medir la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera terrestre y con ello demostrar su incremento desde la revolución industrial hasta hoy día, el CO<sub>2</sub> emitido por el desarrollo de la industria y el transporte ha sido considerado el único responsable del cambio climático. La información geológica, obtenida tanto de los registros sedimentarios del Planeta, que constatan numerosos ascensos y descensos del nivel marino ocurridos millones de años anteriores a la revolución industrial y atribuidos a pasados cambios climáticos producidos por variaciones en la radiación solar o por las posiciones orbitales del Planeta conocidas como precesión, oblicuidad y excentricidad (Milankovitch, 1920; Paillard, 2010) vienen a indicarnos que el ritmo climático no es un exclusivo producto del aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Pero, esta verdad, se mezcla o solapa con otra no menos cierta que ha sido obtenida desde el análisis de los testigos cortados en el hielo antártico (Petit *et al.*, 1990; Etheridge *et al.*, 1996; Monnin *et al.*, 2001; Zachos *et al.*, 2001; Luthi *et al.*, 2008; Tripati *et al.*, 2009) pues ellos confirman que el interglaciar que vivimos registra, respecto a los precedentes, un incremento del CO<sub>2</sub> en nuestra atmósfera (Fig. 1).

En resumen, la quema de combustibles fósiles no se puede considerar absolutamente responsable de la aceleración del periodo interglaciar que vive el planeta Tierra, y ello por el simple hecho de que se desconoce cómo evolucionaría sin su quema y porque prestigiosos científicos (Pearson y Palmer, 2000; Pagani *et al.*, 2005; Pomar y Ward, 1995; Pomar, 2018) muestran como el calentamiento se anticipa al aumento del CO<sub>2</sub>, desajuste temporal que devuelve protagonismo a la actividad solar. Por contra, si se mira a los cuatro últimos interglaciares conocidos como Würm, Riss, Mindel y Günz, se puede interpretar que Würm sobrepasa el ritmo ascendente de los tres anteriores, lo que motiva que la discusión siga abierta para una gran parte de la comunidad científica. A pesar de ello, una gran parte de la misma, no toda, que es prácticamente silenciada por las campañas mediáticas que defienden la total supresión de los combustibles fósiles, acepta que un cambio climático natural, semejante a los muchos sufridos por el Planeta, es ace-



lerado por las emisiones de gases de efecto invernadero propiciadas por la industria, el transporte y especialmente por la generación de electricidad desde las térmicas que queman grandes cantidades de carbón (casos de China y Estados Unidos) y otras como Rusia, India, Japón y Europa, que ejemplarizan a grandes economías emisoras de CO<sub>2</sub>, queman o no grandes cantidades de carbón.

No es este el lugar para discutir si el cambio climático es semejante a los cuatro últimos y cuánto se acelera el interglacial cálido por el que transitamos por las emisiones antrópicas, pero ante la duda, los compromisos adquiridos y sus posibles consecuencias, se impone repasar las actuaciones necesarias para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y de esta forma, al menos, aminorar las consecuencias del cambio climático, independientemente de que lo consideremos natural o artificialmente acelerado.

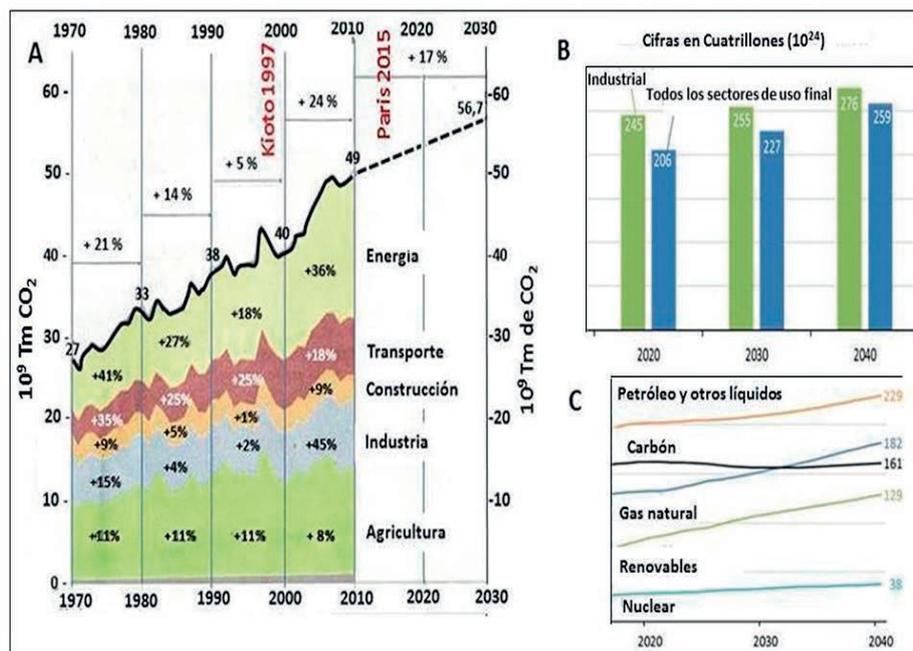
A nivel mundial y por sectores, las mayores fuentes de emisión se fijan en la generación de energía, la agricultura, la industria, el transporte y la construcción (Fig. 2). Agricultura y construcción deben ser las menos revisables porque ellas son necesarias para alimentar y dar vivienda digna a una población creciente; luego, se impone reducir emisiones en energía, transporte e industria, y en Es-

paña ya existen medios para hacerlo en estas tres grandes fuentes de emisiones:

- Energía (incremento de las renovables, de las térmicas de ciclo combinado y la supresión de las térmicas de carbón, al menos de aquellas que queman carbón importado).
- Transporte (coches eléctricos, híbridos, a gas o a hidrógeno).
- Industria y electricidad (reducción de emisiones mediante filtros eficientes, especialmente en térmicas, acerías y cementeras).

Citemos ahora algunas cifras de interés que son poco conocidas pero que muestran la dimensión del problema. Para producir el 100% de la electricidad que España necesita (253 TWh / 10<sup>12</sup> vatios hora) y por sectores, puede expresarse que:

- Eólica: tenemos 13.000 aerogeneradores y necesitaríamos 65.000.
  - Termosolar: tenemos 50 plantas y necesitaríamos unas 700 nuevas plantas.
  - Hidroeléctrica: existen 1300 y necesitaríamos cerca de 12.000.
  - Nuclear: habría que pasar de 7 a 38-40 reactores nucleares.
- La que podríamos llamar la “España verde” (eólica, termosolar, fotovoltaica, hidráulica y nuclear) produce el 60% de la electricidad necesaria (Fig. 3) y aunque la construcción de sus plantas también implica emisiones, su beneficio es indu-



dable, pero su problema se centra en la necesaria implementación de térmicas que reemplacen la ausencia del viento, la lluvia o el sol, para no dejar un país a oscuras e industrialmente paralizado, durante, presumiblemente cortos, pero dañinos, intervalos temporales.

El 40% restante del mix eléctrico del año 2018 viene de la “España contaminante” y se distribuye en: térmicas de carbón (15% - 51 MTm emitidas), térmicas de ciclo combinado a gas (11% - 37 MTm) y cogeneración (12% - 40 MTm). Es decir, la “España no contaminante” en generación de electricidad emitió un total aproximado de 128 MTm que representa el 38% del total emitido por la industria, el transporte, la agricultura, la construcción, la ganadería etc., grupo de actividad sobre el que, con la excepción del transporte, es difícil actuar para reducir sus emisiones y no menoscabar el bienestar.

Por el contrario, parece evidente que el cambio de las térmicas de carbón a ciclo combinado a gas, que para idéntica potencia instalada emiten un 60% menos (Termuehlen, 2001) reducirían las emisiones totales en 35 MTm año, cifra nada despreciable porque representa el 21% del compromiso adquirido. Si a ello añadimos que los ciclos combinados a gas se utilizasen al 70-90% y no al 10%, como ahora ocurre, la generación eléctrica estaría asegurada cuando la ausencia de viento, sol y lluvia precisasen de su ayuda. Dicho de otra forma, 68 grupos en 35 centrales de ciclo combinado a tiempo completo producirían 26.985 millones de vatios, lo que representa el 94% de la electricidad necesaria en España.

Aunque este cambio del carbón al gas parezca suficiente, como no podemos predecir ni cuánto durará, ni cómo evolucionará el interglacial cálido que vivimos, porque si es como los anteriores (Würm, Riss, Mindel y Günz) podría tardar 5000-6000 años en llegar el interglacial frío que siempre ha sucedido al cálido (Fig. 1) y como esperarlo y predecirlo es una enorme irresponsabilidad, porque nuestra tecnología no alcanza a dosificar, modificar o predecir la actividad de “nuestro padre Sol”, se impone actuar en dos direcciones: expandir las fuentes limpias y reducir las contaminantes; pero sin olvidar que un moderado efecto invernadero es necesario para no convertir al Planeta en una inmensa e indeseable bola de hielo.

Ante las dudas, los compromisos y los miedos, se impone adoptar medidas tales como:

- Utilización del coche eléctrico, híbrido, a gas, a hidrógeno.
- Instalación de filtros eficaces en la industria, especialmente en cementeras y siderúrgicas.

- Captura del CO<sub>2</sub> en las térmicas y reducir el precio de la misma ya que hoy se estima en 45 \$/Tm, que es prácticamente el doble de los actuales (25 \$/Tm) de derechos de emisión, razón por la que no se dejaría de emitir.

- Investigar si lo arrojado por las chimeneas de las centrales térmicas e industrias no precisa de los altos costes actuales de captura del CO<sub>2</sub> (CCS, *Carbon Capture and Storage*) porque quizás podríamos transportar, inyectar y secuestrar en trampas geológicas el mix de todo lo que ellas emiten, en estado gaseoso o líquido.

- Identificar y preparar trampas geológicas fiables donde inyectar-secuestrar el CO<sub>2</sub> que inevitablemente producirá el mantenimiento de la actividad económica.

- Incremento del número de aerogeneradores y plantas termosolares y fotovoltaicas.

- Desarrollo de las plantas de cogeneración, más aún si son de última generación y capturan el CO<sub>2</sub> producido.

- Desarrollo de la mini-hidráulica.

- Economizar energía con un cambio de conducta individual y familiar.

- Cambiar a térmicas de ciclo combinado de gas el mayor número posible de las de carbón, al menos de aquellas que queman carbón importado.

Y conviene no olvidar que:

- 1) La lucha no puede hacerse destruyendo el estado del bienestar que tanto costó conseguir o impedir que lo alcancen las sociedades menos desarrolladas, a las que injustamente les negaríamos sus opciones de prosperidad.

- 2) La lucha ha de ser global, pues no servirá de nada el esfuerzo de unos pocos países, mientras otros (China, EEUU, India, Rusia, Japón y UE) arrojan más del 60% del CO<sub>2</sub> emitido.

- 3) El Planeta se recuperó de cambios climáticos originados por causas externas y planetarias (impacto de grandes meteoritos, volcanismo masivo y otras causas, aún en investigación) que en cinco ocasiones acabaron con el 70-90% de las especies vivas. La capacidad de la nuestra es excepcional, lo que no permite asegurar su eterna supervivencia, porque ni ella ni nuestro amado planeta Tierra pueden sustraerse a la extinción y a la eternidad del sistema que rige nuestro sol.

- 4) Que a nivel mundial en el año 2013, la generación de energía procedía en porcentajes del 33,6 del petróleo, del 29,6 del carbón, en un 23,8 del gas natural, en un 6,5 de la hidroeléctrica, en un 5,2 de la nuclear y en un 1,3 de las renovables (Fig. 3). Esta distribución hace evidente que suprimir en un corto plazo los combustibles fósiles que aportan el 87% de la energía nece-

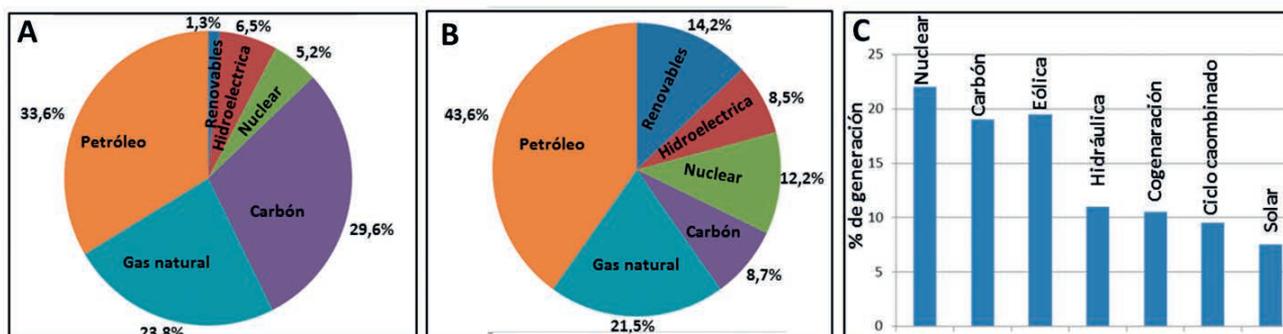
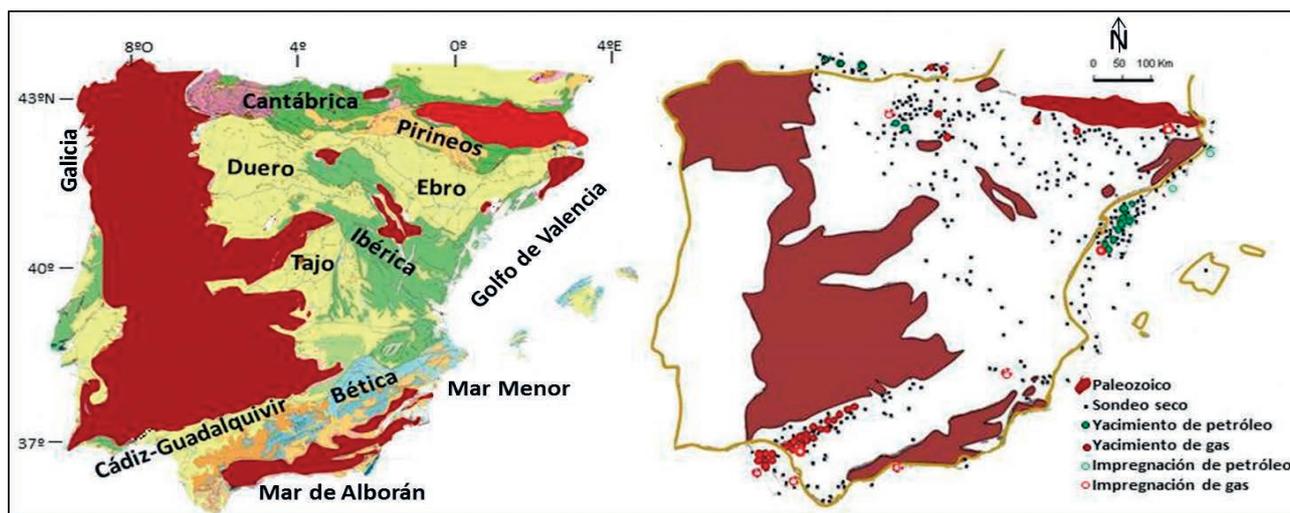


Fig. 3.- A-B. Producción de energía en el Mundo y en España (British Petroleum, 2005). C. El mix eléctrico de España en el año 2018 (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).



**Fig. 4.-** Las doce cuencas sedimentarias de España exploradas para hidrocarburos y el resultado de tal actividad que conforma la base de datos del subsuelo. Por una simple cuestión de escala se han suprimido los cientos de miles de kilómetros de líneas sísmicas existentes.

saría, es una misión imposible; pero suprimir en su totalidad no es lo mismo que reducir. Los ejemplos recientes de lo que significó el gas del Mar del Norte para la desaparición del famoso *smock* de Londres, y la reciente reducción de emisiones de China y EEUU por disminuir la quema del carbón y aumentar la del gas natural, son buenos indicadores del camino a seguir.

5) España es líder en energías renovables (Fig. 3) y ello hace que si consideramos que el uranio no es fósil, la quema de combustibles fósiles para nuestro mix eléctrico se sitúa en el 28,3% (carbón 18,5 y ciclos combinados 9,8), lo que nos coloca en una excelente posición mundial (58,7 puntos por debajo) lo que no explica el énfasis mediático en la supresión total de los combustibles fósiles en nuestro país, porque parece inducido, más por una doctrina a seguir, que por una urgente necesidad nacional.

6) Según distintos puntos de vista, la pasada cumbre de París del 2015 y la reciente de Katowice en 2018, son consideradas un éxito o un fracaso, motivo por el que parece necesario comentar cómo llegaron a ellas 200 países:

- Todos concienciados sobre la necesidad de aminorar el cambio climático, y casi todos culpando de su aceleración al efecto invernadero producido por el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, unos con argumentos científicos y otros, los menos, con solo mediáticos y quizás doctrinarios.

- Las economías ricas, que son las más emisoras de CO<sub>2</sub>, aduciendo que para mantener su previsible creciente consumo eléctrico, no pueden, de la noche a la mañana, dejar de quemar combustibles fósiles, en especial, el accesible y económico carbón, del que algunas de ellas disponen abundantemente, como son los casos de China y EEUU.

- Los países en desarrollo y en vías de hacerlo, argumentando que ellos no son los responsables del panorama actual y que es injusto que renuncien al bienestar que proporciona la electricidad, aunque generarla desde combustibles fósiles produzca emisiones.

Podemos decir que ni la cumbre de París ni la de Katowice fueron un fracaso, pues se concienció de un problema y se adoptaron acuerdos, que algunos países, no todos, se comprometieron a cumplir, y entre estos últimos estamos nosotros, en el horizonte del próximo año 2030.

## Parte 2. Programa ALGECO2 (localización de trampas geológicas donde secuestrar el CO<sub>2</sub>)

La España marina y terrestre, que proporciona datos de Geología (afloramientos y sondeos) y Geofísica (especialmente líneas sísmicas) está distribuida en nueve cuencas sedimentarias: Cantábrica, Mediterráneo, Guadalquivir-Golfo de Cádiz, Pirineos, Valle del Ebro, Duero, Tajo, Ibérica y Bética (Fig. 4). La mayor parte de las líneas sísmicas que conforman la base de datos, soporte de su análisis, fueron obtenidas hace 30-40 años, con anterioridad al enorme progreso experimentado por las nuevas técnicas de obtención con altas coberturas y procesado de sus datos, y ya sean en 2D o 3D, no se ha realizado su mejora mediante los modernos algoritmos de reprocesado (Martínez del Olmo, 2015, 2018). Si a ello añadimos que tan solo existen 710 sondeos y no los 9200 de Francia, los 8500 de Italia o los 26.000 del Reino Unido, se puede decir que nuestra base de datos no es la idónea para la definición de las buscadas trampas geológicas; pero sus datos son los únicos que, al día de hoy, pueden llevarnos a valorar la fiabilidad de su estanqueidad, el ritmo diario de inyección por pozo inyector y el número de toneladas de CO<sub>2</sub> que ellas pueden albergar.

Con esas deficitarias bases de datos, en el año 2007 la Fundación Para Estudios de la Energía (Martínez del Olmo, 2007a, b) realizó una revisión geológica-geofísica utilizando los archivos técnicos de Repsol Exploración y toda la información recogida en los mapas geológicos de España (Serie Magna, 1:50.000 del IGME y mapas geológicos de Andalucía, Cantabria, País Vasco y Cataluña editados por las CCAA). El trabajo culminó en la propuesta de crear 10 Reservas del Estado donde secuestrar el CO<sub>2</sub> que fueron recogidas en el BOE en el año 2007 (Fig. 5). Breve tiempo después la Fundación para Estudios de la Energía, ahora en colaboración con el IGME (Martínez del Olmo, 2008; Zapatero y Martínez del Olmo, 2008) publicó una escueta nota que de nuevo aborda el tema que nos ocupa.

Un año más tarde, la búsqueda de trampas es abordada por el IGME con el programa ALGECO2, acrónimo de Almacenes Geológicos de CO<sub>2</sub>. El IGME contó con la colaboración de CGS Ingeniería, Inypsa, Gessal, Geoprín y Geoservei y formalizando su propósito, trató de estudiar el potencial de almace-

namiento de la España terrestre, no la marina, y formalizó un ranking de posibilidades al que se agregó toda una serie de trabajos por hacer. Pero ahí quedó todo paralizado, porque por unos u otros motivos, solo se interesaron o asumieron que para cumplir el compromiso del año 2030 es necesario secuestrar el CO<sub>2</sub> en trampas geológicas:

- La ciudad de la energía en León (Fundación Ciuden), que se ocupó primordialmente de la captura del CO<sub>2</sub> en las centrales térmicas de carbón por oxidación y que ha iniciado un programa piloto de inyección en el viejo yacimiento petrolífero de Hontomin en el norte de Burgos.

- Endesa, que en las cuencas del Duero y del Ebro adquirió nueva sísmica 2D y 3D, perforó dos sondeos, tras los que sin dar explicaciones geológicas-económicas, abandonó las áreas otorgadas, y hasta donde conocemos, sin poner a disposición de la comunidad geológica la información obtenida, y ello a pesar de que su obtención fue subvencionada por la UE.

- Oil and Gas Capital s.l. que solicitó dos permisos (Los Páramos y Penibético) en áreas críticas por su alto nivel de emisiones, teniendo el objetivo de iniciar los programas de definición de las trampas que había visualizado; permisos que abandonó, en un caso, por la drástica bajada de los precios de los derechos de emisión (posible error porque en el último año han pasado de 8 a 25 \$/Tm y muchos analistas pronostican que seguirán subiendo) y porque en la de, en teoría, mayor capacidad hay una explotación de canteras que la Comunidad Autónoma de Andalucía advirtió que se debía salvaguardar.

- Cepsa, que en las provincias de Huelva y Cádiz, tiene solicitados grandes bloques de exploración, sin duda por su proximidad a una de las regiones más contaminantes de España (Algeciras) donde Cepsa es activa.

De las anteriores líneas se deduce que, una cosa son los compromisos adquiridos para aminorar el cambio climático y otra muy distinta es el conocimiento geológico, la inversión necesaria para alcanzar el objetivo, la rentabilidad de la misma, la infraestructura de un país para digerir tal reto geológico-económico y las iniciativas-ayudas que su Gobierno, CCAA y ayuntamientos tomen para poder conseguir que en el próximo año 2030 alcancemos el cumplimiento de lo acordado en París en el 2015.

Como ya se ha anticipado, las Reservas del Estado (Fig. 5) fueron publicadas y rápidamente olvidadas, por ser reprobadas por las instituciones (ayuntamientos y CCAA) y porque posiblemente no se aceptaba que el Estado tuviese Áreas de Reserva

porque ellas cohibían la iniciativa privada y la probable obtención de subvenciones por realizar trabajos para mitigar el cambio climático. A pesar de ello, probablemente fueron el pistoletazo que alertó del problema e indujeron a que en el año 2007 el IGME iniciase el programa ALGECO2, que trató de establecer una relación y un ranking de las trampas geológicas donde secuestrar, a perpetuidad y con garantías, el CO<sub>2</sub> que ya se emitía y el que inevitablemente se emitiría. Por causas desconocidas, pero posiblemente motivadas por las diferencias de inversión de virtuales desarrollos de la inyección-secuestro en tierra y mar, el área a investigar por ALGECO2 se redujo a la España terrestre, a lo que posiblemente también contribuyó que Casablanca, nuestro mayor yacimiento de petróleo (>3000 MTm CO<sub>2</sub>-eq) y marino, fuese cuestionado por problemas de heterogeneidad del almacén y sello lateral (Vallauré y Mallo-García, 2005).

Al día de hoy, y hasta donde conocemos, el programa está muerto o abandonado desde la finalización de su primera fase en el año 2009. Nueve años de parón, público y privado, en los que no se ha continuado con una segunda fase de estudio que debería tratar de establecer donde iniciar la inyección atendiendo tanto al ranking previamente establecido como a la localización geográfica de la trampa (proximidad o lejanía de las zonas con mayor volumen de emisiones). Además, dado que un alto porcentaje de las mismas no están completamente definidas, ultimar mediante nuevos datos geológicos (almacenes y sellos) y especialmente geofísicos (nueva sísmica 2D o 3D) sus valoraciones y capacidades de secuestro, y dejar a las iniciativas privada (evitar el pago de los derechos de emisión) o pública (compromiso del año 2030) elegir donde continuar y ultimar el trabajo.

Como también se ha comentado previamente, el trabajo realizado por el IGME y sus contratistas partió de líneas sísmicas no reprocesadas, algunas de muy baja calidad derivada de los años de su disparo, y en muchas ocasiones con exigua densidad de malla, factores que impedían asegurar los requisitos de estanqueidad o favorabilidad de las trampas, su capacidad de secuestro y la fiabilidad de las interpretaciones con las que se conformó el listado de posibilidades.

Para dar una idea de las optimistas conclusiones a las que llegó aquella primera fase de ALGECO2 elaborada por CGS Ingeniería (Béticas), Inypsa (Ibérica), Gessal (Pirineos-Ebro) y Geoprin (Cantábrica) y modulada por el llamado Comité de Expertos y Geoservei, primero se describen sus conclusiones y segundo se compara con cuencas con un alto nivel de exploración-producción, caso del Mar del Norte:

1) Se estudiaron 103 trampas que acumulan 35.000 MTm de capacidad de secuestro (Fig. 5), equivalente a 200 años de compromiso español.

2) De ese total de 103 trampas, a 47 se les asignó una capacidad individual mayor de 50 MTm que acumulan un total posible de 31.000 MTm, lo que equivale a 180 años de compromiso.

3) De esas 47, a 28 trampas se les asignó capacidad mayor de 200

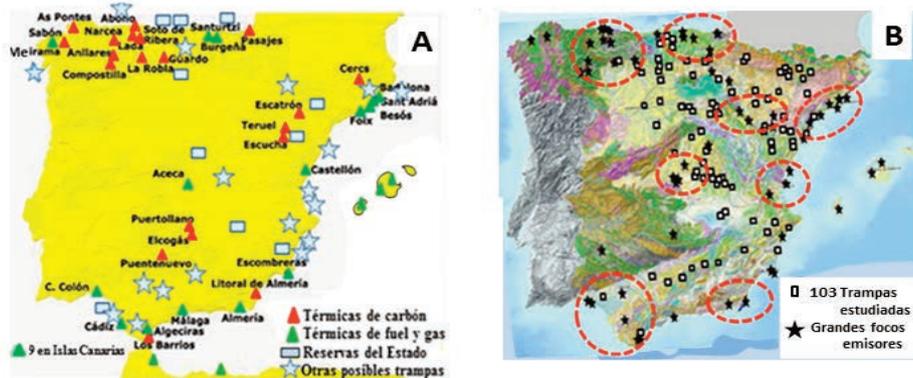


Fig. 5.- A. Generación de electricidad junto a la propuesta de Reservas del Estado (Martínez del Olmo, 2007a). B. Las 103 trampas estudiadas en ALGECO2 (IGME, 2009) y las ocho regiones con mayor volumen de emisiones.

MTm que acumulaban una capacidad de inyección de 28.014 MTm, equivalente a 160 años de compromiso.

4) A otras 8 se les calculó un potencial de almacenamiento mayor de 1000 MTm que significaban una magnífica oportunidad de secuestro de 23.834 MTm, unos 130 años de compromiso.

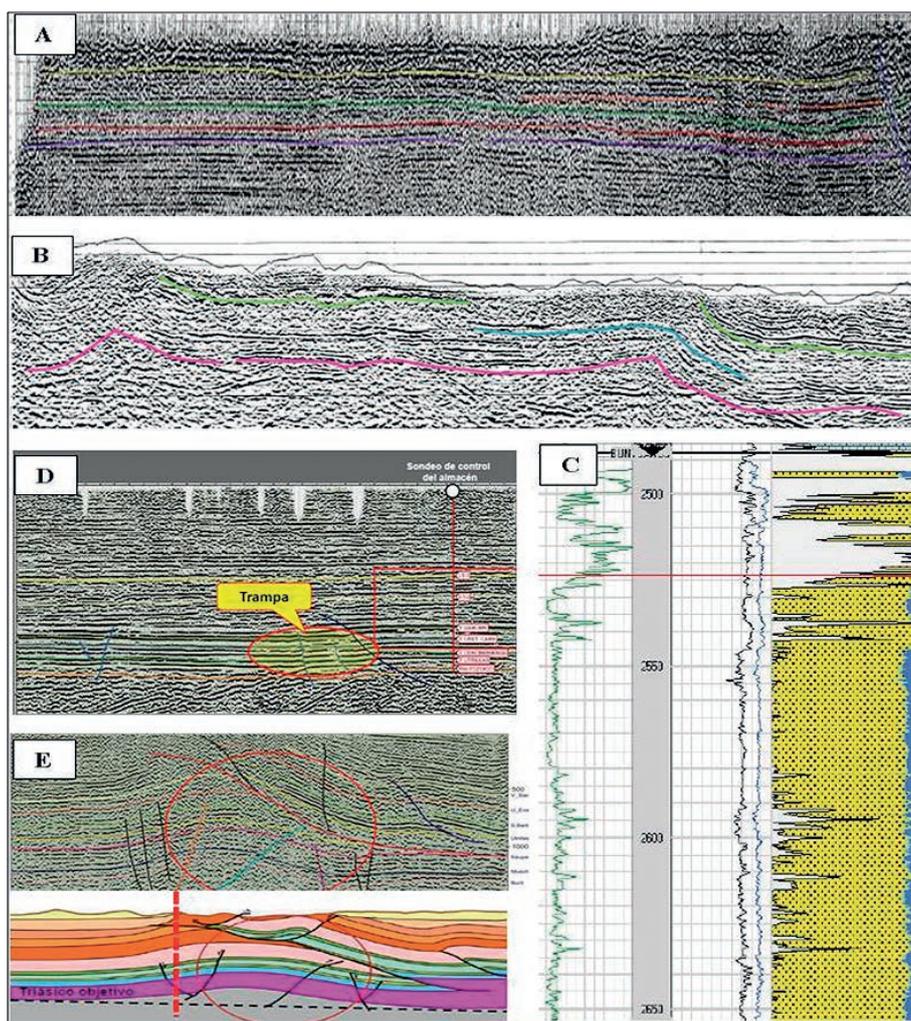
Las cifras de los casos 1 a 4 representan un 94, 83, 75 y 62%, respectivamente, de todo lo que en la inmensa y muy conocida provincia petrolífera del Mar del Norte (Inglaterra, Noruega, Dinamarca, Alemania y Holanda) se le atribuye de capacidad de almacenamiento en los yacimientos de gas y petróleo ya agotados, que es calculada en 37.000 MTm; porcentajes que serían mucho más significativos si en el Mar del Norte contabilizáramos las trampas que no contienen hidrocarburos, porque también allí hay cientos de sondeos sin gas o petróleo pero con almacenes, sellos y geometría de trampa. Esta simple comparación entre la España terrestre, pequeña y poco explorada, y una gran cuenca petrolífera, bien explorada, proporciona una escala que lleva a pensar en:

- La muy optimista evaluación-interpretación de la primera fase del programa ALGECO2, posiblemente derivada de la ya aludida y deficiente base de datos, especialmente de Geofísica, a la que quizás se puede agregar la escasa experiencia de los contratistas del IGME en la valoración de probabilidades de confirmación de los datos provenientes de la interpretación del subsuelo; lo que usualmente se conoce como valoración de riesgos de almacén, sello y trampa de un proyectado sondeo exploratorio.

- La gran diferencia entre lo que significa la presencia de rocas madre generadoras de hidrocarburos (caso del Mar del Norte) y la escasa presencia de ellas para cargar de gas o petróleo a las numerosas posibles trampas de ALGECO2 (caso de España).

Una revisión de lo incluido en los trabajos realizados en ALGECO2, permite visualizar lo optimista de sus interpretaciones, de las que unos pocos ejemplos son suficientes para expresar ese optimismo en definir y dar por válidas un elevado número de trampas bajo condiciones tales como las recogidas en la Figura 6:

- Trampa de 500 km<sup>2</sup> de cierre con menos de 40 milisegundos tiempo doble de cierre vertical (40-60 m) y con líneas



**Fig. 6.-** Optimistas interpretaciones de ALGECO2: A. 500 km<sup>2</sup> y 268 MTm de capacidad con una muy pobre malla y calidad sísmica y con 50 m de cierre vertical. B. 390 km<sup>2</sup> y 262 MTm en un almacén pre-salino del Triásico con tres culminaciones difíciles de precisar. C. 50 km<sup>2</sup> y 600 MTm bajo un cabalgamiento con sello muy delgado y probablemente discontinuo del Cenomanense inferior. D. 105 km<sup>2</sup> y 120 MTm en trampa bajo falla inversa con salto inferior al espesor del almacén arenoso del área. E. 395 km<sup>2</sup> y 277 MTm en probables falsos cierres, tipo *pullup*, bajo unidades cabalgantes de alta velocidad (A, C y D. Cuenca del Duero / B. Cordillera Ibérica / E. Depresión Intermedia).

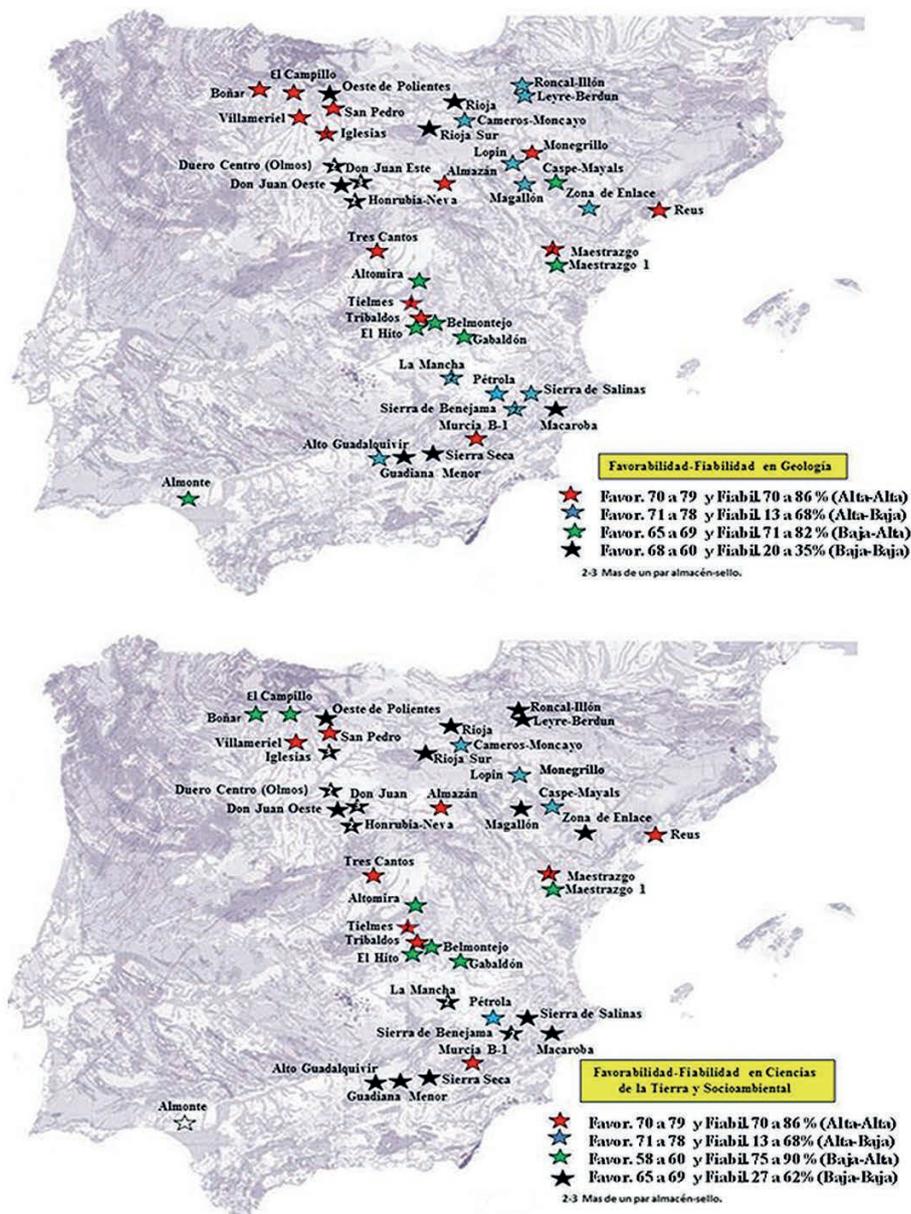
sísmicas con escasa malla y muy pobre calidad. Ella contabiliza 268 MTm de capacidad.

- Trampa de 390 km<sup>2</sup> con tres culminaciones en un almacén pre-Keuper salino que no define con nitidez la vieja sísmica y que no ha sido tratado con un moderno análisis de velocidades y transformación en profundidad (262 MTm de capacidad).

- Trampa de 50 km<sup>2</sup> de área cerrada bajo un sello de espesor inferior a 20 m, probablemente no continuo y cortado por fallas (600 MTm de capacidad). Caso especialmente llamativo.

- Trampa de 105 km<sup>2</sup> bajo falla inversa que tiene un salto inferior al grueso almacén de alta porosidad controlado en un sondeo muy próximo realizado al otro lado de la falla (120 MTm de capacidad).

- Ejemplos de probables falsos cierres (*pullup*) de 395 km<sup>2</sup> producidos por la alta velocidad de propagación sísmica de unidades cabalgantes y cierres en isócronas que no han sido



**Fig. 7.-** Las 45 trampas seleccionadas de las 103 iniciales en ALGECO2 desde Favorabilidad y Fiabilidad. Nótese que algunas de ellas cambian su valoración según se use Geología o Ciencias de la Tierra y Socioambientales.

tratados con las modernas técnicas de restitución en profundidad (277 MTm de capacidad).

A esto hay que agregar que tres de las trampas con una capacidad conjunta evaluada entre 9500 y 13.000 MTm se visualizan como extensos monoclinales (Tres Cantos, La Zona de Enlace y La Mancha) razón por lo que sin dejar de ser atractivas, no pueden considerarse definidas o ya dispuestas para una inyección de CO<sub>2</sub>. Es decir, entre datos muy dudosos u optimistas y monoclinales faltos de definición y control, los 37.000 MTm calculados son reducidos entre un 30% y un 50%, lo que todavía parece una capacidad optimista (27.000 y 19.000 MTm) por su comparación con el Mar del Norte.

En resumen, de la revisión de la primera fase del programa ALGECO2, ya sea por la capacidad de almacenamiento y por la fiabilidad de los datos de Geología y Geofísica que las sustentan, se puede concluir que:

- 27 trampas son pequeñas (< 50 MTm) y en consecuencia poco fiables en su definición que, si se confirmasen, solo serían útiles para centros de emisión próximos y de orden menor, como por ejemplo una térmica de ciclo combinado.

- 23 son muy pequeñas (< 10 MTm), aún menos fiables y útiles.

- 45 trampas, están inmaduras en su definición, y con capacidad de almacenamiento individual mayor de 50 MTm (Fig. 7).

Atendiendo a su localización y no exclusivamente a criterios de favorabilidad-fiabilidad, 13 de esas trampas se consideraron las más propicias porque representaban oportunidades geográficamente bien distribuidas: El Campillo, Don Juan y Olmos en la cuenca del Duero; Roncal-Illón en Pirineos, Zona de Enlace en la cuenca del Ebro, Tres Cantos (El Pradillo) y Tribaldos-Tielmes en la cuenca del Tajo, Maestrazgo-1 (Mirambell) en la Ibérica y La llanura de la Mancha, Pétrola, Alto Guadalquivir y Murcia B-1 en la Bética (Fig. 8).

Los anteriores calificativos de inmaduras, no fiables, optimistas y problemáticas provienen de:

- Inmaduras: ausencia de líneas sísmicas suficientes, líneas sísmicas de muy mala calidad y carencia de sondeos que testifiquen el almacén y el sello en un entorno próximo.

- No fiables: *pullup* bajo cabalgamientos, almacén o sello no contrastado por sondeo, sello < de 50 m de espesor, y presencia de fallas que probablemente alcanzan la superficie.

- Optimistas: interpretación muy valiente de los escasos datos geofísicos y de sondeo.

- Problemáticas: bajo o muy próximas a centros urbanos o muy costosas por profundas.

En resumen, si desconfiamos de las pequeñas, muy pequeñas o simplemente creemos que ellas no solucionarían nuestro problema, y a ellas agregamos las inmaduras, las posibilidades de cumplir nuestro compromiso, no solo en tiempo sino también en volumen, parecen realmente difíciles de conseguir, más aún cuando los trabajos necesarios para ultimar su definición no se han iniciado y además se sospecha que muchos de ellos tropezaran con trabas medioambientales, que en caso de resolverse porque las instituciones presionen, retrasarán 1-2 años su revisión.

El programa ALGECO2 trató de corregir muchos de estos interrogantes para ultimar un ranking de 45 posibilidades desde las 103 iniciales, que estableció en base a dos criterios:

- Capacidad de almacenamiento a la que se atribuyó una sola cifra en MTm que se fijó en que concernían a 103 trampas y capacidades de secuestro tales como: 20 trampas < 50 MTm, 47 trampas > 50 MTm, 28 trampas > 200 MTm y 8 trampas > 1000 MTm.

- Fiabilidad + favorabilidad de la trampa desde datos geológicos, de Ciencias de la Tierra y Socioambientales; calificados respectivamente como alta-alta (12-13 trampas), alta-baja (8 trampas), baja-alta (8-9 trampas) y baja-baja, (31-38 trampas) fijando el límite entre alta y baja en el 70% de probabilidad de existencia de las condiciones de partida (Fig. 7).

Y sorprende que yacimientos de petróleo y gas, ya agotados o próximos a su final, casos de Ayoluengo, Hontomin, Casablanca y Amposta, no fueron tenidos en cuenta. Volveremos a ellos en las conclusiones finales.

Cuando desde la Figura 7 se atiende a las dos condiciones valoradas (fiabilidad y favorabilidad desde Geología y Ciencias de la Tierra-Socioambientales) con probabilidad mayor del 70% se obtiene que 19 y 16 trampas podrían ser seleccionadas desde ambos criterios, pero una cuidadosa revisión de los datos transferidos por ALGECO2 permite dudar de muchas de ellas para una primera fase de detalle que debe focalizarse en las más seguras (Fig. 8). Las líneas siguientes resumen lo obtenido de la revisión realizada.

- Trampa Boñar. Bajo cabalgamiento del Paleozoico de muy difícil reconstrucción estructural en profundidad y con problemas de sellado en la salbanda de la falla inversa que superpone el Paleozoico al Cretácico Superior arenoso y car-

bonatado, constatado con buenas porosidades en sondeos próximos.

- Trampa Iglesias. Paleógeno muy arenoso que provoca la ausencia de sello del Cretácico objetivo que además contiene agua dulce en el sondeo Iglesias-1.

- Trampa Almazán. Probable ausencia de cierre estructural y presencia de agua dulce en el sondeo El Gredal-1.

- Trampa Reus. Excesiva proximidad al núcleo urbano y posible superficie cerrada muy inferior a la propuesta por el consultor del IGME.

- Trampa Maestrazgo. Notable complejidad estructural desde la sísmica utilizada, ausencia de sello en la Formación Imón y muy baja porosidad (< 2,5%) en el Muschelkalk-3 objetivo.

- Trampa Monegrillo. Muy baja porosidad (< 3,0%) en los almacenes del Triásico que constituyen su objetivo.

- Trampa San Pedro. Baja capacidad y existencia de tres viejos sondeos con cementaciones muy deficientes que serían difíciles de rectificar, por lo que podrían comunicar con la superficie una inyección de CO<sub>2</sub>.

- Trampa Villameriel. Probable ausencia de cierre porque el almacén supera en espesor el salto de la falla inversa que define la trampa, sello inferior a 20 m de espesor y presencia de agua dulce.

- Trampa Altomira. Notable efecto de *pullup* que seguramente invalida la totalidad o gran parte del cierre propuesto.

- Trampa Tielmes. Interpretación muy optimista desde una sísmica de baja calidad y malla, pero que es posible re-procesar y ultimar a bajo coste.

- Trampa Belmontejo-Gabaldón. Fallas hasta superficie, sísmica de muy mala calidad, profundidad excesiva para los almacenes del Triásico, Formación Cuevas Labradas sin sello, Muschelkalk y Buntsandstein sin porosidad y agua dulce en el sondeo Gabaldón-1.

- Trampa El Hito. Almacenes triásicos sin cierre o grandemente disminuido por efecto de un notable *pullup*.

Dicho de otra forma, si en exploración de hidrocarburos el riesgo es el producto de las probabilidades de existencia de siete factores (almacén, sello, trampa, roca madre, vías de migración, conservación y edad de la migración), para el caso que nos ocupa únicamente consideramos almacén, sellos vertical y lateral en los monoclinales, definición mediante sísmica de la trampa y ausencia de fallas hasta la proximidad de la superficie. Es decir, en lugar de siete factores de riesgo (Martínez del Olmo, 2019) los reducimos a cuatro, lo que es una notable reducción que no



**Fig. 8.-** Las 25 trampas a las que ALGECO2 les otorgó una probabilidad de existencia mayor del 70% desde Fiabilidad y Favorabilidad de las que seis, por los motivos descritos en el texto, son aceptadas junto a otras siete consideradas de interés para una primera fase de definición, ya sea por su localización, posible alta capacidad o proximidad a los focos emisores.

tranquiliza en demasía pero que al final trataremos de estimar para la totalidad de las trampas (marinas y terrestres) de España a las que esta revisión se dedica. Y conviene no olvidar que fallas hasta superficie constituyen un factor problemático que es preciso monitorizar cuando la inyección se inicie y avance, mientras que las otras tres (almacén, sello y trampa) no impiden que la posibilidad no exista, pero sí que su capacidad sea mucho menor de lo estimado inicialmente. Y como en la caracterización de una trampa y su contenido en hidrocarburos suelen ser necesarios 3-4 sondeos de control y confirmación cuando la superficie cerrada supera los 10-20 km<sup>2</sup>, podemos decir que todas o las más problemáticas o peor definidas necesitarán más de un sondeo de verificación y precisarán de una monitorización de la inyección y de un control de una posible sismicidad inducida, porque ya fuese por un altísimo ritmo de inyección o por una casual coincidencia temporal de la inyección de metano y pequeños terremotos naturales, el caso Castor, yacimiento de Amposta, no puede descuidarse.

Tal y como se ha anticipado, el programa ALGECO2 realizó una valoración individualizada de las 103 trampas que fueron interpretadas. La valoración atendía a criterios tales como: fiabilidad-favorabilidad de los datos para el almacén, el sello y su fracturación, el tipo de estructura (anticlinal o monoclinal), capacidad de almacenamiento, afección a acuíferos o recursos mineros, interacción del CO<sub>2</sub> con el almacén, difícil de predecir, localización en proximidad o lejanía a los centros emisores, preservación del territorio y medio ambiente y aspectos socioeconómicos. Además indicó que no existía ninguna trampa totalmente definida, en especial las de presumible alta capacidad que se fijaban en tres monoclinales (Tres Cantos, Zona de Enlace y La Mancha).

Parece evidente que si el problema es serio, de todos los criterios estimados en el programa ALGECO2 la tríada almacén-sello-trampa debe prevalecer sobre los demás, porque aunque la capacidad sea importante, volúmenes pequeños (< 50 MTm) próximos a centros de emisión pueden ser considerados de interés porque equivalen a la vida útil de una central térmica.

Para dar una idea de los párrafos precedentes baste indicar que la UE recomienda:

- Profundidad del almacén entre 800 y 2000 m para alcanzar el estado crítico del CO<sub>2</sub>, porque al alcanzarlo ocupa menor volumen en la trampa.

- Espesor del almacén, deseablemente arenoso, > 20 m y preferible > 50 m.

- Porosidad del almacén >10% y deseable > 20%.

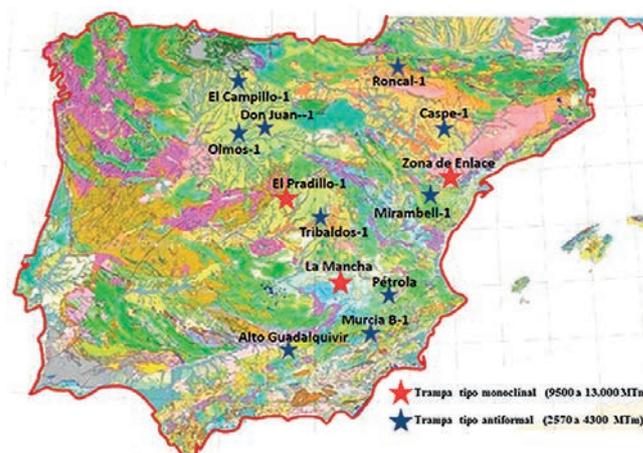
- Espesor del sello > 50 m y deseable > 100 m.

- Salinidad del agua de formación > 10 g/l.

- Presión capilar del sello >> que el empuje del gas finalmente inyectado.

Las 25 trampas finalmente seleccionadas por ALGECO2 (Fig. 8) cumplen con la profundidad y el gradiente geotérmico que asegura el estado crítico, pero como ya se anticipó, su definición no está finalizada.

Esta tarea inacabada la podemos trasladar a riesgo de confirmación o probabilidad de existencia desde los datos de Geología-Geofísica anticipados en el texto, lo que reduce las posibilidades a solo 13 trampas (Fig. 9) con probabilidades de confirmación entre el 10% y el 85%. Si esta probabilidad se aplica a la capacidad teórica asignada en ALGECO2 podríamos hablar de 5000-7000 MTm de capacidad de secuestro para el conjunto de posibilidades, lo que equivale a 30-40 años del compromiso adquirido por España en París. Este ejercicio-simulación no es la última palabra si se trabaja en ultimar su definición, porque lo peor que puede suceder es que algunas de ellas hayan de ser abandonadas o reduzcan su capacidad de almacenamiento, pero también puede ocurrir que otras alcancen su capacidad teórica que, en ciertos casos tales como los de Olmos, Tres Cantos y la Zona de Enlace, aumentarían significativamente la capacidad de secuestro y los años de cumplimiento del compromiso adquirido. Y no es solo compromiso sino también economía, porque los rampantes precios de los derechos de emisión (desde 5 a 25 € por Tm en el 2018) y su ahorro durante 30-40-50 años siempre serán cientos de veces mayor que los programas de sísmica y sondeo que se estiman necesarios para concluir su valoración, y en caso positivo, su puesta en servicio.



Trampa	Probabilidad de confirmación (%)	Capacidad teórica MTm CO <sub>2</sub>	Techo del almacén-nivel del suelo (m)	Edad Almacén-Sello	Tipo	Capacidad con riesgo MTm CO <sub>2</sub>	Definición desde líneas sísmicas
Murcia B-1	85	350-400	1000	Cretácico Sup.-Mioceno	Antiforma	300-340	Muy buena
El Campillo	80	250-300	2250	Cretácico Sup.-Garumn.	Antiforma	120-240	Buena
Roncal	75	300-350	1700	Buntsandstein-Keuper	Antiforma	225-260	Buena
Caspe	75	100-110	1000	Buntsandstein-Keuper	Antiforma	75-80	Buena
Tribaldos-Tielmes	50	400-450	1300	Buntsandstein-Keuper	Antiforma	200-225	Aceptable
Mirambell	50	120-200	1300	Buntsandstein-Keuper	Antiforma	60-100	Aceptable
Don Juan	40	500-700	1300	Cretácico Sup.-Garumn.	Antiforma	200-280	Aceptable
Alto Guadalquivir	40	150-300	1400	Mesozoico-Olistostroma	Antiforma	60-120	Aceptable
Olmos	25	2000-3000	1300	Cretácico Sup.-Garumn.	Antiforma	500-750	Deficiente
Pétrola	25	250-1000	1800	Buntsandstein-Keuper	Horst	60-250	Sin ella
El Pradillo	70	4500-5000	1300	Oligoceno-Mioceno	Monoclinal	3100-3500	Aceptable
La Mancha	25	1000-1600	700	Buntsandstein-Manuel-Keuper	Monoclinal	275-400	Deficiente
Zona de enlace	10	4000-6500	2200	Buntsandstein-Keuper	Monoclinal	400-650	Sin ella

**Fig. 9.-** Las 13 trampas recomendadas en ALGECO2 con estimaciones de su capacidad por tipo y probabilidad de confirmación que le asignamos después de revisar los datos de Geología y Geofísica aportados por ALGECO2.

### Parte 3. Revisión de la práctica totalidad del área España

No cabe duda de que los compromisos adquiridos con la UE y el corto tiempo que nos separa del año 2030, son motivos suficientes para tratar de revisar las posibilidades de secuestro del CO<sub>2</sub> en las trampas geológicas. Como el compromiso aprieta y el estudio ALGECO2 previo se dedicó únicamente al territorio emergido e introdujo restricciones que hoy pueden considerarse excesivas, las páginas próximas serán dedicadas a una revisión de la totalidad de oportunidades que 10 y 12 años después de aquellos trabajos publicados como Reservas del Estado y ALGECO2 trataban el tema que nos ocupa. Y 10 años es un tiempo razonable para la maduración de ideas, sobre todo si son apoyadas en el progreso conceptual-tecnológico de Geología y Geofísica y en las facilidades que ya promueven los desarrollos marinos de hidrocarburos, en aguas someras y profundas: los sistemas tipo *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) y los sondeos con altas desviaciones de la vertical y trayectorias que fácilmente pueden superar los 5000-7000 m.

Como ya ha sido expresado, ALGECO2 impuso unas limitaciones que pueden ser consideradas excesivas, tales como:

- Obviar trampas con capacidad de < 100 MTm que sin duda pueden ser útiles, quizás imprescindibles, por ser las únicas posibles en provincias geográficas con alto volumen de emisiones.

- Trampas exclusivamente terrestres.

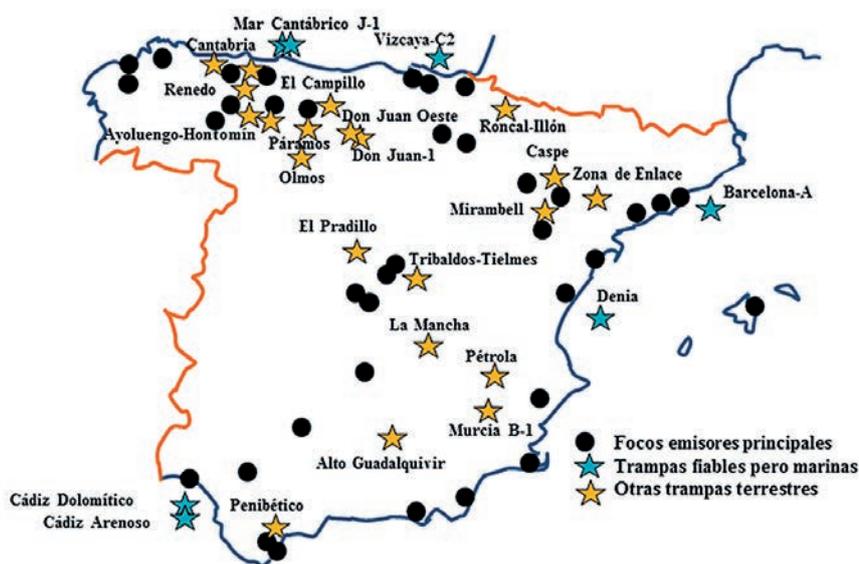
- Trampas que no contabilizan los yacimientos de hidrocarburos conocidos, ya agotados o próximos a su final económico.

- Trampas desestimadas por someras y no alcanzar el estado crítico que reduce el volumen ocupado en el almacén receptor, lo que no implica que su capacidad final sea estimable, en especial por su proximidad a centros emisores.

En los últimos 10 años la tecnología de los medios geofísicos ha aumentado muy notablemente la calidad que mediante modernos reprocesados puede obtenerse de las viejas líneas sísmicas.

Del mismo modo, las posibilidades brindadas por los sistemas FPSO ya muy utilizados por la industria de los hidrocarburos (gas y petróleo) permiten abordar económicamente las trampas marinas cualquiera que sea su distancia a costa y la batimetría de su localización, y este y no otro es el motivo que lleva a incluirlas en esta revisión final de las posibilidades del área España (Fig. 10). Más aún cuando algunas de ellas (Barcelona, Golfo de Cádiz, Mar Cantábrico-J, Vizcaya C-2, y Denia-1) se les reconocen altas capacidades y fiabilidad de existencia, y se hallan en la cercanía de importantes focos de emisión que parecen estar desprovistos de posibilidades terrestres.

Para facilitar la lectura de las páginas siguientes, la descripción de este conjunto de posibilidades será dividida en cuatro subapartados:



Trampa	Almacén		Sello		Área (Km <sup>2</sup> )	Cierre vertical (aprox. m)	Capacidad MTm CO <sub>2</sub>	Localización, Profundidad agua (m), Distancia a costa (km)	Valoración
	Porosidad (%)	Espesor (m), Edad	Espesor (m), Edad						
Ayoluengo	7-8	50-60, J <sub>2,3</sub>	140, J <sub>2,3</sub>	18-20	500	22-24	Burgos	A	
Hontomin	7-8	70, J <sub>1</sub>	90, J <sub>1</sub>	13	250	14-15	Burgos		
Cádiz Dolomítico	7	150, J <sub>2,3</sub>	300, C <sub>2</sub>	20	280	60	Golfo Cádiz, 40 (12)		
Denia	22	80, Mio. Sup.	350, Mio. Sup.	240	>600	>700	Mediterráneo, 70 (15)		
Barcelona-A	8	150, C <sub>1</sub>	600, Mio. Sup.	60	400	>500	Mediterráneo, 430 (15)		
Vizcaya-C2	8	130, C <sub>2</sub>	2000, C <sub>3</sub> -Olig.	20	200	250	Cantábrico, 75 (5)	B	
Cádiz Arenoso	24-25	40-50, Mio. Sup.	1200, Mio. Sup.	1000	Monoclinal	>700	Golfo de Cádiz, 30 (10)		
Murcia B-1	8	1200, C <sub>1,2</sub>	700, Paleog.	>50	600	>350	Murcia		
El Campillo	18-20	80, C <sub>1,2</sub>	400, C <sub>3</sub> -Paleog.	>25	90	150	Palencia		
Caspe	17	200, Bunt.	100, Muschel.	80	100	100	Ebro		
Roncal-Illón	5	85, Bunt.	100, Muschel.	500	80	>300	Pirineos		
Don J-1 y Oeste	7	250, C <sub>2</sub>	850, C <sub>3</sub> -Paleog.	>40	100	600	Duero		
Mirambell	12-13	150, Bunt.	1200, Muschel.	15-18	180	>150	Maestrazgo		
Los Páramos	14-16	200, C <sub>2</sub>	500, C <sub>3</sub> -Paleog.	30-32	300	>350	Burgos		
Mar Cantábrico J-1 S	12	140, C <sub>2</sub>	1000, C <sub>2</sub>	120	200	270	Mar Cantábrico, 55 (3,5)		
Mar Cantábrico J-1 P	5	1400, C <sub>1</sub>	1000, C <sub>2</sub>	150	200	250	Mar Cantábrico, 55 (3,5)		
Alto Guadalquivir	8	1440, C <sub>1,2</sub>	800, Mio. Sup.	40-50	150	240	Jaén	C	
Tribaldos-Tielmes	7-8	50-60, Bunt.	160, Muschel.	>160	75	150	Tajo		
Pétrola	18	35, Bunt.-Keup.	500, Keup.	200	40	250	Albacete		
Olmos	8	175, C <sub>2</sub>	900, C <sub>3</sub> -Paleog.	80	Monoclinal	2500	Duero		
Penibético	7-8	200, J <sub>2,3</sub>	1200, C <sub>3</sub> -Paleog.	25	80	>80	Cádiz		
El Pradillo	18-20	250, Olig.-Mioc.	380, Olig.-Mioc.	280	Monoclinal	>4000	Madrid	D	
La Mancha	8	30, Bunt.-Muschel.	450, Keup.	1200	Monoclinal	700	Ruidera		
Zona de enlace	14	150, Bunt.	80, Muschel.	400	Monoclinal	>4000	Ebro		
Cabezón de la Sal	8	500, Bunt.-C <sub>1,2</sub>	1000, Keup.	12	125	50	Cantabria		
Renedo-Sopeña	5	400, Bunt.	300, Keup.	40	100	80	Cantabria		

**Fig. 10.-** La totalidad de las trampas de interés, marinas y terrestres, que esta revisión propone. Valoración del riesgo de confirmación-capacidad en la Figura 11. A. Trampas con muy alta probabilidad de existencia y de la capacidad indicada. B. Trampas necesitadas de un pequeño programa de nueva sísmica 2D, mejor 3D, y/o monitoreo de una inyección inicial. C. Trampas necesitadas de un nuevo programa de sísmica 2D o sondeo de control antes de promover una inyección. Recomendadas por localizarse en la proximidad de altas emisiones. D. Trampas necesitadas de un nuevo programa de sísmica 2D antes de decidir su idoneidad. Recomendadas por su posible alta capacidad y/o localización en áreas con alta emisiones.

- Trampas geológicas completamente definidas de alta y baja capacidad, susceptibles únicamente de un programa de monitorización de la inyección del CO<sub>2</sub> y de un control de la posible sismicidad inducida, con probabilidad de existencia > 90%.

- Trampas geológicas con probabilidad de existencia entre el 70% y 90% que podrían verse afectadas por una reducción de su capacidad en la mayor parte de ellas.

- Trampas geológicas con probabilidad de existencia entre el 50% y el 70% que podrían, como las anteriores, disminuir más sensiblemente su capacidad e incluso desaparecer.

- Trampas geológicas con una probabilidad de existencia difícil de establecer con los datos existentes, probablemente menor del 40% pero de indudable interés por su alta capacidad de almacenamiento, las reducidas inversiones que precisa su detalle y su proximidad a los focos emisores.

Una escueta descripción de todas ellas (almacén, sello y capacidad) queda recogida en la Figura 10. Se trata de un gran conjunto de posibilidades de almacenamiento, con altas y bajas probabilidades de confirmación, recogidas en la Figura 11.

*Trampas completamente definidas de alta y baja capacidad (figuras 10 y 12)*

Como razonablemente podía esperarse por la densidad-espaciado de la malla sísmica y la calidad de los datos, con la excepción de dos terrestres (Ayoluengo y Hontomin), las demás trampas han sido seleccionadas por su localización en sectores marinos que son coincidentes con zonas de altas emisiones de CO<sub>2</sub>. Su interés deriva de sus altas capacidades y de las posibilidades económicas brindadas por los sistemas FPSO.

*Ayoluengo y Hontomin:* trampas muy fiables a nivel de los carbonatos del Jurásico marino de baja porosidad y deducible baja capacidad (20-30 MTm); menos fiables en las arenas del Jurásico-Cretácico (facies Pürbeck y Weald) por su medio sedimentario en canales de pequeña dimensión y alta sinuosidad (escasa continuidad lateral) y la presencia de fallas que alcanzan la superficie. Los datos del programa piloto que se realiza en Hontomin, de los que no disponemos, serían necesarios para ultimar su valoración.

*Golfo de Cádiz:* dos posibilidades accesibles desde una misma vertical de 60 y 700 MTm de capacidad que radican en el Jurásico carbonatado investigado por los sondeos Golfo de Cádiz D-1 y D-2 y los numerosos sondeos que cortan las turbiditas arenosas de la Formación Arenas del Guadiana del Messiniense-2, cuyos yacimientos en gas metano biogénico están muy próximos al agotamiento, motivo por el que si una posible inyección del CO<sub>2</sub> los alcanzase, esta podría ser minusvalorada.

*Denia-1:* una excelente y fiable posibilidad frente a la costa de Valencia en la llamada calcarenita del sondeo que le da nombre (porosidad del 20-25%, espesor 180 m y profundidad de 2000 m) con una alta capacidad de secuestro (> 800 MTm) y accesible desde una instalación fija en 70 m de batimetría, o desde otra aún menos profunda (40-50 m) con sondeos desviados, lo que abarataría sus costes de instalación.

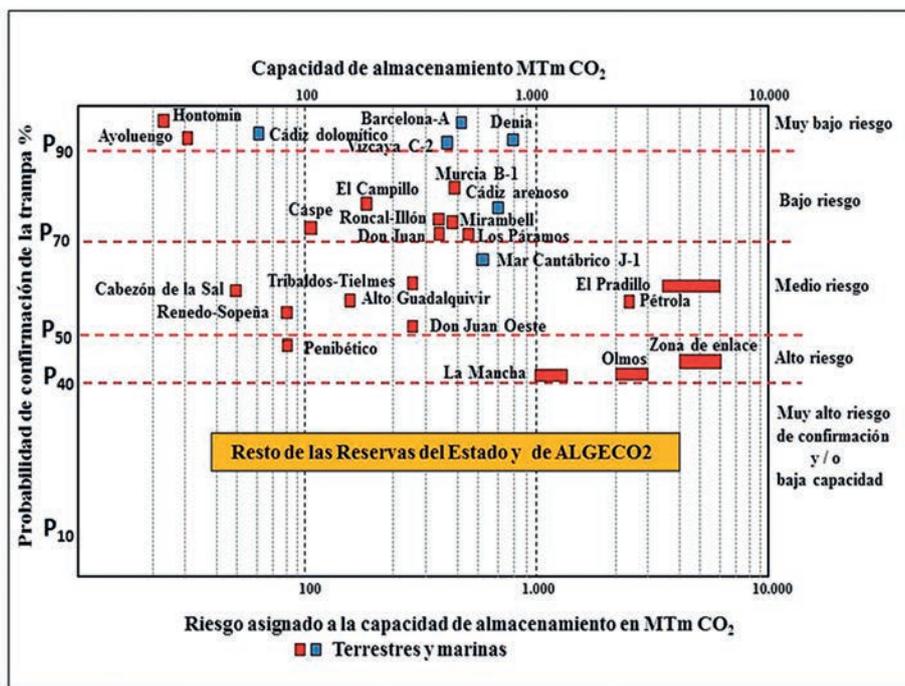
*Barcelona Marino A-1:* otra trampa fiable y de gran capacidad de almacenamiento (> 400 MTm) frente a la costa de Barcelona en 435 m de agua pero accesible con FPSO o desde sondeos desviados desde una instalación fija en 70-100 m de agua.

*Vizcaya C-2:* accesible desde instalación fija, en 75 m de batimetría, e incluso desde sondeos desviados desde la costa y que posee una capacidad de almacenamiento próxima a los 250 MTm en un área desprovista de otras posibles trampas y con altos volúmenes de emisión.

*Trampas con alta probabilidad de existencia y probable alta capacidad (figuras 10, 13 y 14)*

Con excepción de Los Páramos, todas las demás provienen de las recomendaciones propuestas por el programa ALGECO2. Ellas se conciben no completamente definidas, asignándoseles una probabilidad del 75% para una capacidad de almacenamiento tal como la recogida en la Figura 10. Las dos de más baja capacidad (El Campillo y Caspe) centran su interés por localizarse en áreas con un alto nivel de emisiones.

*Murcia B-1:* trampa de alta capacidad (> 390 MTm) contro-



**Fig. 11.-** Conjunto de posibilidades marinas (azul) y terrestres (rojo) que por diversos motivos (fiables, capacidad, localización e inversión necesaria para una definición final y su puesta en funcionamiento) son tenidas en cuenta en este trabajo y son descritas en el texto y las figuras siguientes.

lada por una aceptable malla sísmica y dos sondeos que muestran dos posibilidades de almacén (Cretácico Superior sobre el que se ha calculado su capacidad) y Barremiense-Aptiense carbonatado y arenoso que no ha sido evaluado por contener porosidad de matriz del orden del 3-4% a la

que se puede agregar una intensa red de microfracturación natural que aumentaría considerablemente la capacidad de secuestro. Asignarle una probabilidad del 75% deriva de que se interpreta como una geometría tipo anticlinal cortada por una gran falla que sería preciso definir con sísmica

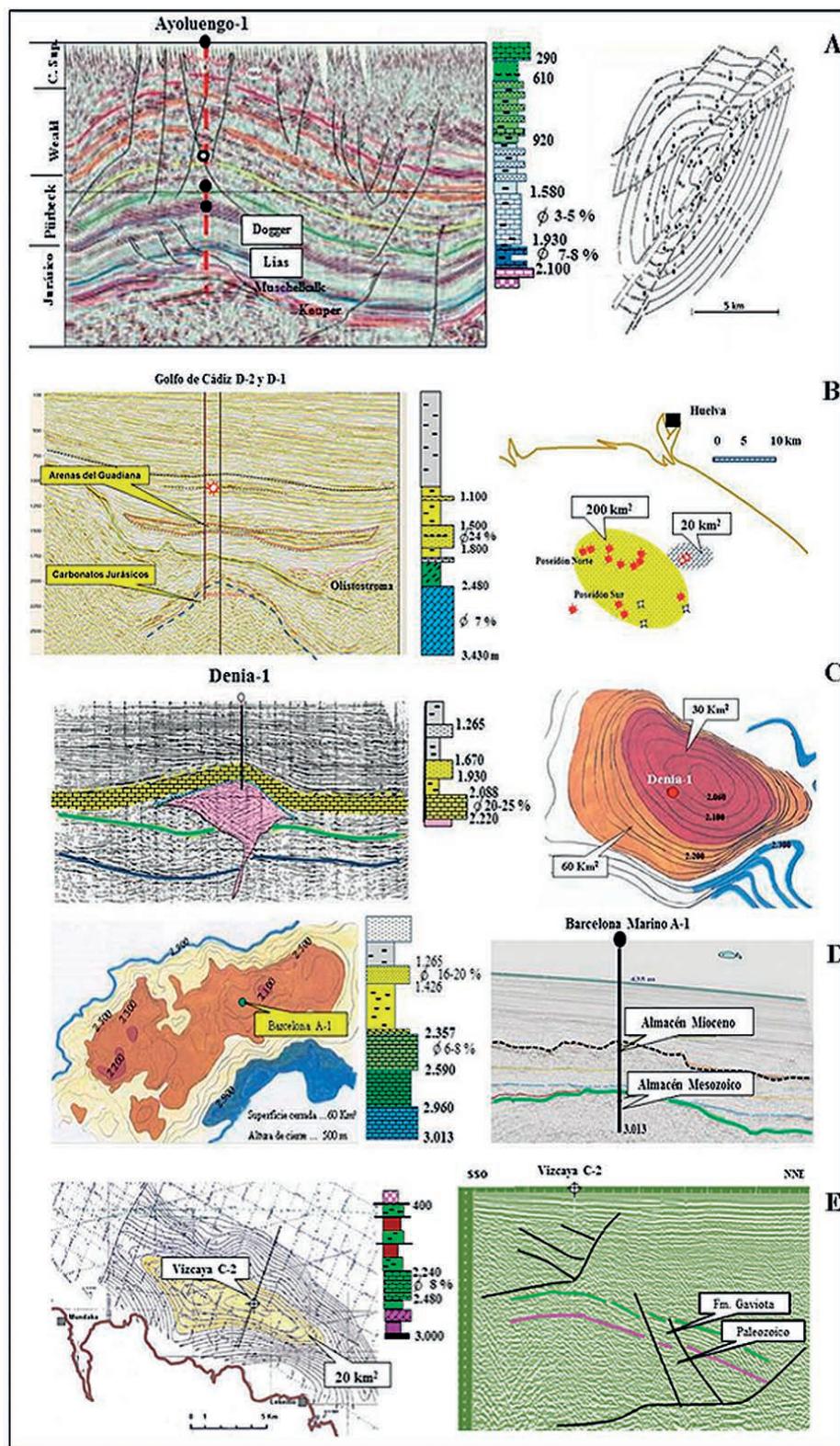
en 3D y controlar con una monitorización de la inyección. En ALGECO2 encabezaba el ranking de posibilidades.

*El Campillo-1*: trampa tipo anticlinal que podría aumentar su capacidad mínima de 150 MTm porque su cierre incluya a las facies arenosas del Cretácico Inferior y no solo a las excelentes del Albiense superior, tabular y marino transgresivo, y a las fluvio-desérticas de las más profundas facies Utrillas y Escucha.

*Caspe-1*: probable trampa tipo *flower* bien definida, muy fracturada y con dudas relativas a la permanencia o continuidad lateral de la porosidad (17%) asignada al almacén del Triásico, sujeto regionalmente a variaciones notables, por lo que no es fácil de extrapolarla a un área de 80 km<sup>2</sup>. Su mayor atractivo radica en su estimada capacidad de 100 MTm, su localización, profundidad (500-600 m) y en el espesor del almacén arenoso del Buntsandstein (100 m en Mayals-1 y 200 m netos en Caspe-1).

*Roncal-1-Illón*: con la gran duda de que la culminación llamada Illón esté realmente cerrada, en cuyo caso no se alcanzarían los 500 km<sup>2</sup> indicados en ALGECO2, pues se verían reducidos en más de un 50%. Si a ello se añade un espesor neto de almacén menor de 100 m y una porosidad del 4-5% en el Buntsandstein objetivo y su localización en una región con bajas emisiones, se disminuye notablemente su interés.

*Don Juan-1 y Don Juan Este*: trampas con baja porosidad de matriz de los almacenes carbonatado y arenoso del Cretácico y una posible porosidad por fracturas deducida de las pérdidas de circulación del sondeo Don Juan-1, y con un Triásico arcilloso en facies de



**Fig. 12.-** Resumen geológico-geofísico de cinco de las trampas consideradas de muy bajo riesgo de existencia en las figuras 10 y 11: Ayoluengo, Cádiz arenoso y Cádiz dolomítico, Denia-1, Barcelona Marino A-1 y Vizcaya C-2 (modificados de: A. Abeger *et al.*, 2005; B, C, D y E. Martínez del Olmo, 2007).

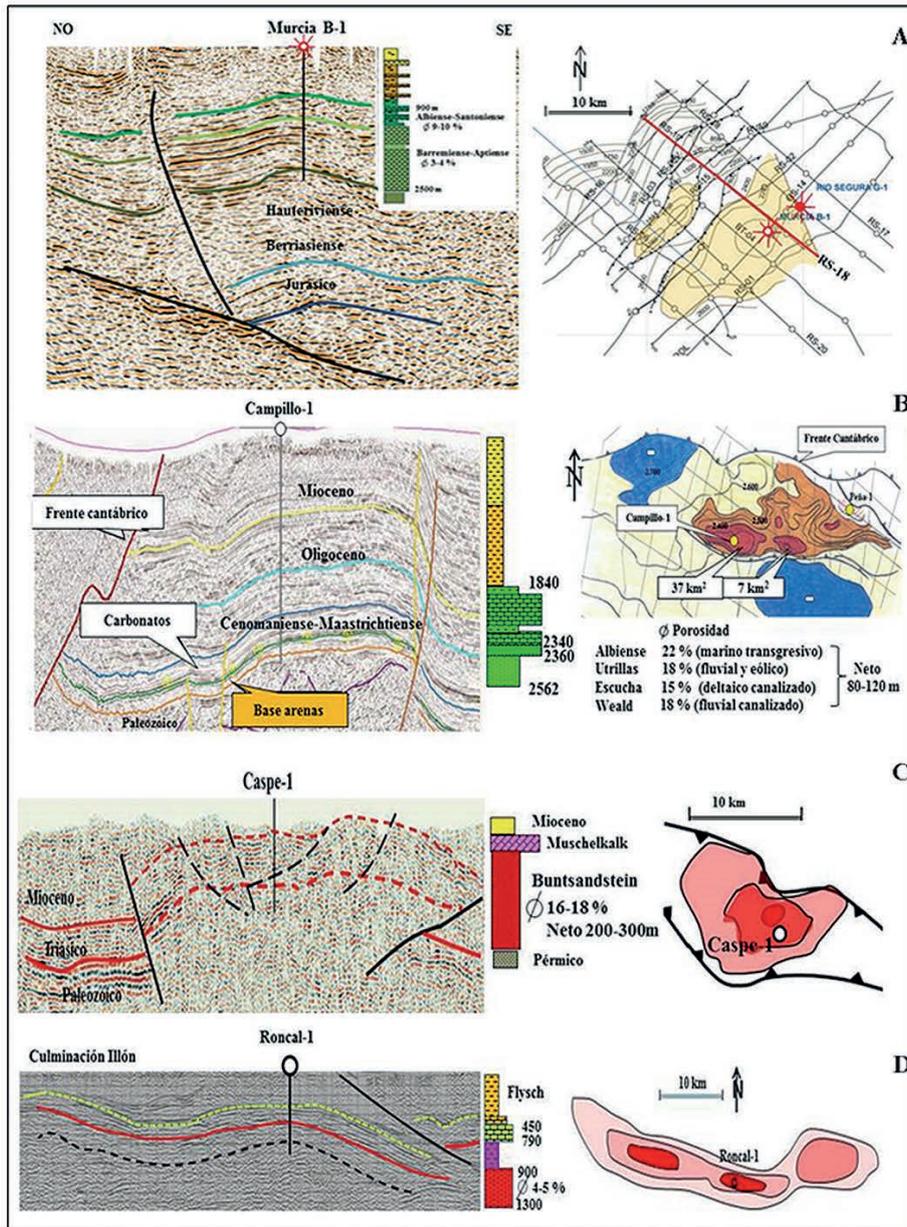


Fig. 13.- Resumen geológico-geofísico de cuatro de las trampas consideradas de bajo riesgo de confirmación en las figuras 10 y 11: Murcia B-1, El Campillo-1, Caspe-1 y Roncal-1 (modificados de: A y B. Martínez del Olmo, 2007; C y D. ALGECO2 IGME, 2009)

conglomerados. A ello se añade una pobre definición desde la información sísmica (líneas no reprocesadas) pero de interés por ubicarse en la necesitada cuenca del Duero y porque entre ambas trampas podrían superarse los 1000 MTm de capacidad.

*Mirambell-1*: trampa con almacén y sello muy aceptables y que ALGECO2 estudió con las viejas líneas sísmicas, no reprocesadas, lo que motivó su minusvaloración. Cuando desde los archivos de Repsol se accede a los reprocesados, ellos mejoran su interpretación estructural. Junto a Caspe-1 identifica la mejor oportunidad en la cuenca del Río Ebro y su enlace con la Cordillera Ibérica.

*Los Páramos*: trampa con 120 a 200 m netos de almacén arenoso con porosidad del 16-18% del Cretácico Superior, 300 m de cierre vertical y 800-1000 m de sello del Oligoceno-Mioceno constatados por los próximos sondeos de San Pedro. Sus tres culminaciones podrían agruparse en

una única por una nueva interpretación realizada por líneas sísmicas reprocesadas, caso en el que podría llegar a alcanzar 400-500 MTm de capacidad de secuestro.

*Trampas con poca probabilidad de existencia (figuras 10 y 15)*

Son cuatro las consideradas de interés en el Programa ALGECO2. De ellas únicamente (Don Juan Oeste) se localiza en un área con necesidad de programas de almacenamiento, a la vez que otras (Alto Guadalquivir, Tribaldos-Tielmes y Pétrola) se ubican en la proximidad de otras, ya descritas, con más atractivas posibilidades. La quinta y última (Mar Cantábrico J) se considera necesitada de no más de 200 km<sup>2</sup> de sísmica 3D y su interés radica en su probable alta capacidad y su proximidad a los grandes focos emisores del N-NO de la península.

*Alto Guadalquivir*: trampa sin sondeo que controle las condiciones del almacén, pero bajo un inmejorable sello provisto por el olistostroma mioceno, que dificulta la interpretación estructural por la pantalla que este representa para la definición de las líneas sísmicas. Si se llegan a definir los 25 km<sup>2</sup> de cierre, podría albergar más de 150 MTm en el Cretácico arenoso y carbonatado de un Prebético visible

bajo el olistostroma en las líneas sísmicas recientemente reprocesadas.

*Tribaldos-Tielmes*: mal definida por la vieja sísmica, baja porosidad del almacén receptor y una no contrastada área cerrada (>160 km<sup>2</sup>), datos que le otorgan dudas razonables, que podría ser resueltas con el poco costoso reprocesado de la viejas líneas sísmicas.

*Pétrola*: trampa tipo *horst* con perfectos almacén (arenisca de Manuel) y sello (Jurásico Inferior arcilloso-evaporítico y Keuper) constatados en los sondeos de Ledaña-1, Salobral-1, Carcelén-1 y en los próximos afloramientos de Montealegre del Castillo. Trampa que puede alcanzar los 200 km<sup>2</sup>, pero definida con geología de superficie, lo que le otorga una duda razonable que puede solventarse con la adquisición de no más de 100 km de nueva sísmica que podrían indicar una capacidad mínima >250 MTm.

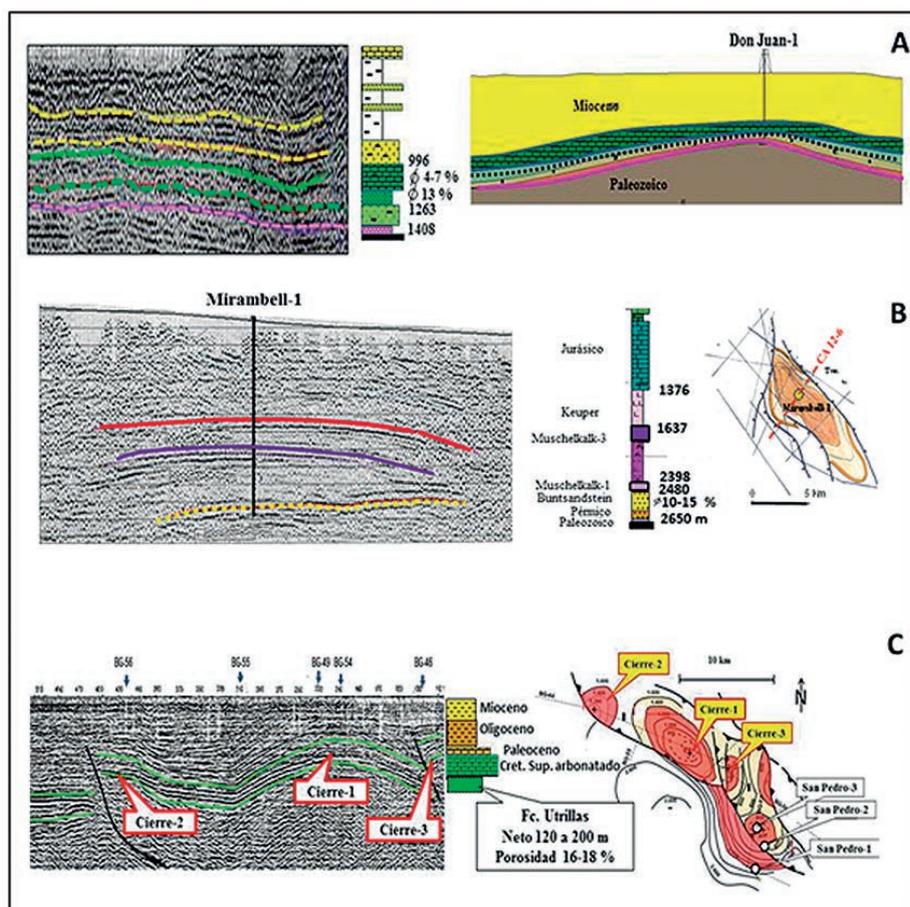


Fig. 14.- Resumen geológico-geofísico de otras tres trampas consideradas de bajo riesgo de confirmación en las figuras 10 y 11: Don Juan-1, Mirambell-1 y Los Páramos (modificados de: A. ALGECO2, IGME, 2009; B. Martínez del Olmo 2007; C. Motis *et al.*, 2012).

*Don Juan Oeste*: al igual que su próxima Don Juan-1, ya descrita, es una trampa con baja porosidad del almacén cretácico y pobre definición desde la información sísmica. Su interés se fija en los resultados obtenidos de un posible programa de detalle en Don Juan-1 y de su localización en la necesitada cuenca del Duero.

*Mar Cantábrico J*: trampa tipo anticlinal en aguas de 50 m de profundidad que incluso podría ser alcanzada desde sondeos desviados desde costa. Posee más de 1000 m de espesor de sello y un almacén en calizas del Barremiense-Aptiense que diferencia dos tramos con diferentes espesores y porosidades (uno superior de 140 m y 7-15% de porosidad, y otro inferior de 1500 m de espesor y porosidad del 2-5%), lo que unido a su posible superficie cerrada de 150 km<sup>2</sup>, le otorgan una capacidad mínima de 250 MTm en la proximidad de un área donde los centros emisores son notables. La definición de esta trampa debería ser ultimada con una sísmica en 3D para definir las fallas paralelas a la línea de costa.

*Trampas en localizaciones estratégicas y con una posible capacidad alta a media (figuras 10 y 16)*

Cuatro de ellas son de tipo monoclinas (El Pradillo, Zona de Enlace, La Mancha y Olmos) por lo que sus capacidades de almacenamiento podrían superar los 1000 MTm y fueron estudiadas en ALGECO2. Otras tres, Penibético, Renedo-Sopeña y Cabezón de la Sal, son especialmente in-

teresantes porque quizás representen las únicas existentes en la proximidad de los necesitados Campo de Gibraltar y Cantabria. Las ocho necesitan pequeños programas de nuevas líneas sísmicas que las lleven a asegurar su presencia y capacidad.

*El Pradillo o Tres Cantos*: constituye el monoclinas de mejores perspectivas de todo el territorio nacional porque se corresponde con un enorme lentejón arenoso de alta porosidad y posee un excelente sello. Si a ello añadimos su proximidad a los focos de emisión de Madrid no caben dudas del interés de la realización de un pequeño programa de nueva sísmica que garantice el final del cuerpo arenoso en dirección S-SE.

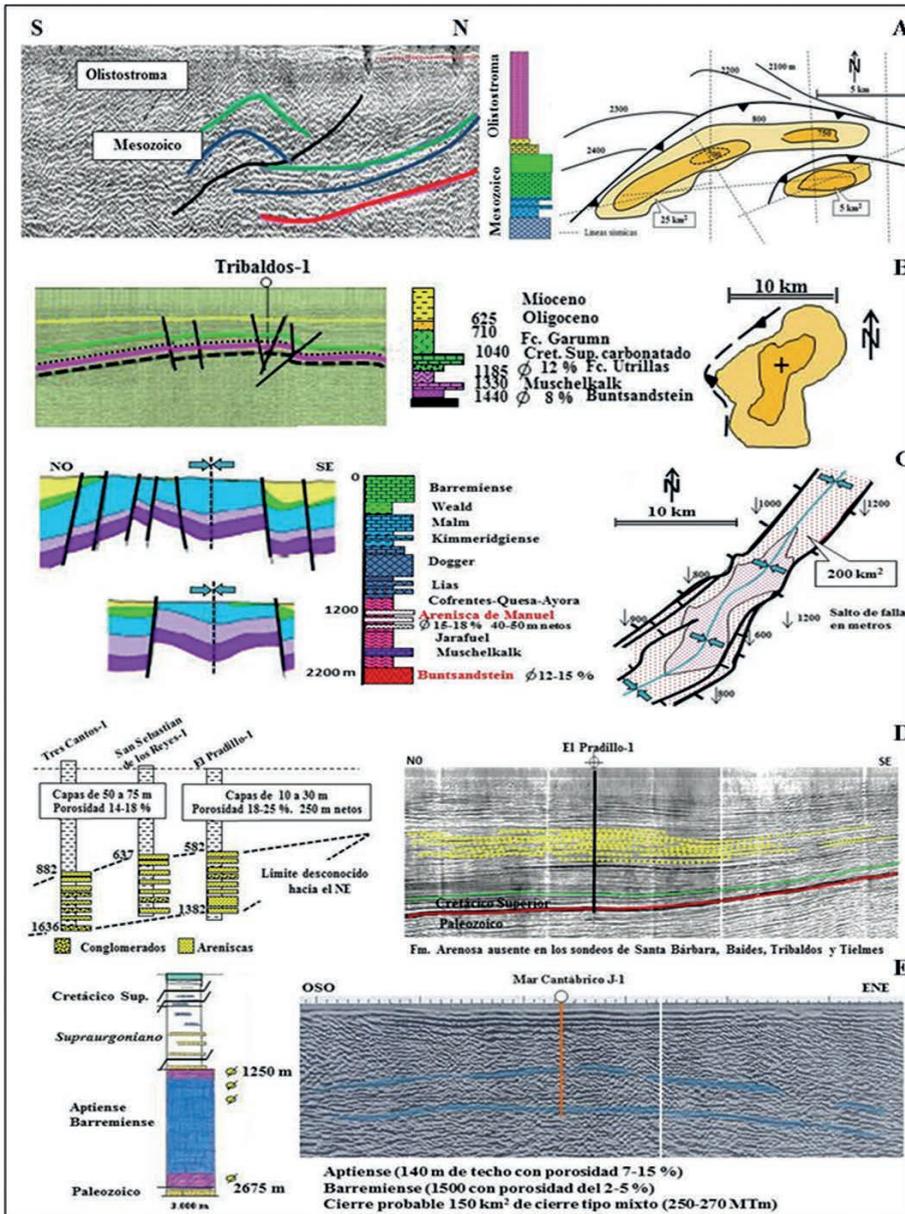
*Zona de enlace*: monoclinas en el Buntsandstein (porosidad en sondeos cercanos del 12-16%) con problemática definición estructural bajo los frentes cabalgantes de las cordilleras Ibérica y Prelitoral, que podrían no sellar la trampa y con una práctica ausencia de información procedente de líneas sísmicas, pero de interés por su

localización en una región con altos volúmenes de emisiones y una altísima capacidad de secuestro caso de ser confirmado por nuevos programas de adquisición sísmica.

*La Mancha*: monoclinas cortado por fallas de pequeño salto y con dos horizontes almacén (Muschelkalk y Arenisca de Manuel del Keuper) y un perfecto sello del Keuper, incluida en las Reservas del Estado y estudiada en ALGECO2. La mejor definición mediante nuevas líneas sísmicas de las fallas que lo aislarían, se considera necesaria para asegurar una capacidad de almacenamiento mayor de 1000 MTm de CO<sub>2</sub>.

*Olmos*: monoclinas próximo a Don Juan en el práctico centro de la cuenca del Duero, de interés por su posible alta capacidad y porque podría ser confirmado por una nueva sísmica que cubriese Olmos, Don Juan y los sondeos de Olmos-1 y Valoria-1. Su probabilidad de confirmación como trampa se estima hoy menor del 10-15%.

*Penibético*: los sondeos Cerro Gordo 1 a 3 y el mapa geológico que muestra el anticlinal de los Canutos que confirmó un proyecto de exploración de Repsol que no llegó a perforar al asignar un muy alto riesgo a la presencia de roca madre. La revisión de los sondeos evidencia que el Jurásico y el Triásico del Penibético constituyen almacenes de aceptable porosidad (6-8%) y espesor (> 550 m) que son sellados por más de 1000 m de arcillas. La interpretación de las viejas líneas sísmicas, no reprocesadas, mues-



**Fig. 15.-** Trampas necesitadas de nuevos datos de sísmica para asegurar su existencia y capacidad recogidas en las figuras 10 y 11: Alto Guadalquivir, Tribaldos-1, Pétrola, Tres Cantos y Mar Cantábrico J-1 (modificados de: A, B y C. ALGECO2, IGME, 2009; D y E. Martínez del Olmo, 2007, 2008)

tran dos trenes estructurales que podrían albergar una capacidad de almacenamiento mínima de 80-120 MTm en las cercanías de la contaminante área de Algeciras. El bajo costo de modernos reprocesados justifica su inclusión como posibilidad de interés porque podría llevar a definir una trampa con capacidad de 80-100 MTm.

**Renedo-Sopeña:** dos anticlinales muy próximos al sur del Escudo de Palomera o Cabuérniga, que pueden totalizar 40 km<sup>2</sup> de cierre estructural para un almacén del Triásico de baja porosidad (4-5%) pero de considerable espesor (400-600 m) que podrían albergar 80 MTm de CO<sub>2</sub> a 800-900 m de profundidad.

**Cabezón de la Sal:** un nuevo anticlinal en el autóctono del Saja al norte del Escudo de Palomera que constituyó un proyecto exploratorio de Repsol que no llegó a realizarse por su alto riesgo de roca madre, aunque la obra civil

y el acceso estuvo ultimada. La deformación afecta al Cretácico y al Triásico (porosidad estimada 12-15% en facies Utrillas, 6-8% en calizas del Aptiense y 4-8% en el Buntsandstein). La imagen sísmica revela la existencia de un extenso flanco norte que podría optimizar la capacidad de almacenamiento que ha sido solamente calculada (Fig. 10) para su culminación cerrada. Esta y la anterior de Renedo-Sopeña se consideran de interés por su cercanía a una región con elevadas emisiones.

### Discusión y conclusiones

Tal y como se indicó al inicio del texto, no es este el foro para discutir si el cambio climático que vivimos es semejante a los muchos que ha sufrido el Planeta y que han sido constatados (Fig. 1) por los registros geológicos y por los testigos cortados en el hielo antártico, pero si la duda existe, ella es motivo suficiente para activar los medios de defensa y así evitar o aminorar el calentamiento global que gran parte de la comunidad científica atribuye a las emisiones de los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>). También, tal y como se ha anticipado, en el año 2017 España superó en un 17% lo emitido en el año de referencia 1990 (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018) por lo que nuestro compromiso de París se fija en

dejar de emitir o secuestrar en trampas geológicas (110,8 MTm) en el próximo año 2030 y años sucesivos.

Del mismo modo, en páginas y figuras precedentes se ha tratado de expresar que de nuestras obsoletas bases de datos de subsuelo deriva un limitado nivel de conocimientos sobre las posibilidades que nuestro país nos brinda para caracterizar con certeza las trampas geológicas donde secuestrar lo emitido y hacerlo sin que por ello perjudiquemos el estado del bienestar que tanto esfuerzo, historia y trabajo, costó conseguir. Tres son las bases de esa meta que, sin duda, es posible alcanzar si nuestras instituciones (Gobierno Central, CCAA y ayuntamientos) legislan adecuadamente:

- Reducción drástica de emisiones, especialmente por la paralización de las térmicas de carbón y el desarrollo de las energías renovables.

- Cambiar a un transporte menos emisor que el actual, ya sea eléctrico, a gas natural, híbrido, etc.

- Y la que motiva este trabajo, que no es otra que el secuestro de las emisiones de CO<sub>2</sub> en trampas geológicas, porque ineludiblemente se producirán emisiones desde las diversas y necesarias tareas que soportan la no paralización del país, destacando por su relevancia la generación de electricidad.

Cuando se atiende a los medios, se induce que tan solo una de ellas (reducción de emisiones a partir de incrementar las energías renovables y la total supresión de la quema de los combustibles fósiles) han llegado a constituir una doctrina que, ha llegado a las jóvenes generaciones de toda Europa, pero que a todas luces, consideramos insuficiente porque las necesidades eléctricas de nuestro país no pueden depender exclusivamente de la meteorología (sol, viento y lluvia) que durante cortos o largos episodios temporales pueden hacer insuficiente la producción desde las energías renovables.

El secuestro en trampas geológicas es factible si se atiende a corto plazo a:

- La financiación, pública o privada, de los programas geológicos necesarios que deben ultimar la definición de las trampas geológicas donde podríamos secuestrar el inevitable CO<sub>2</sub> emitido.

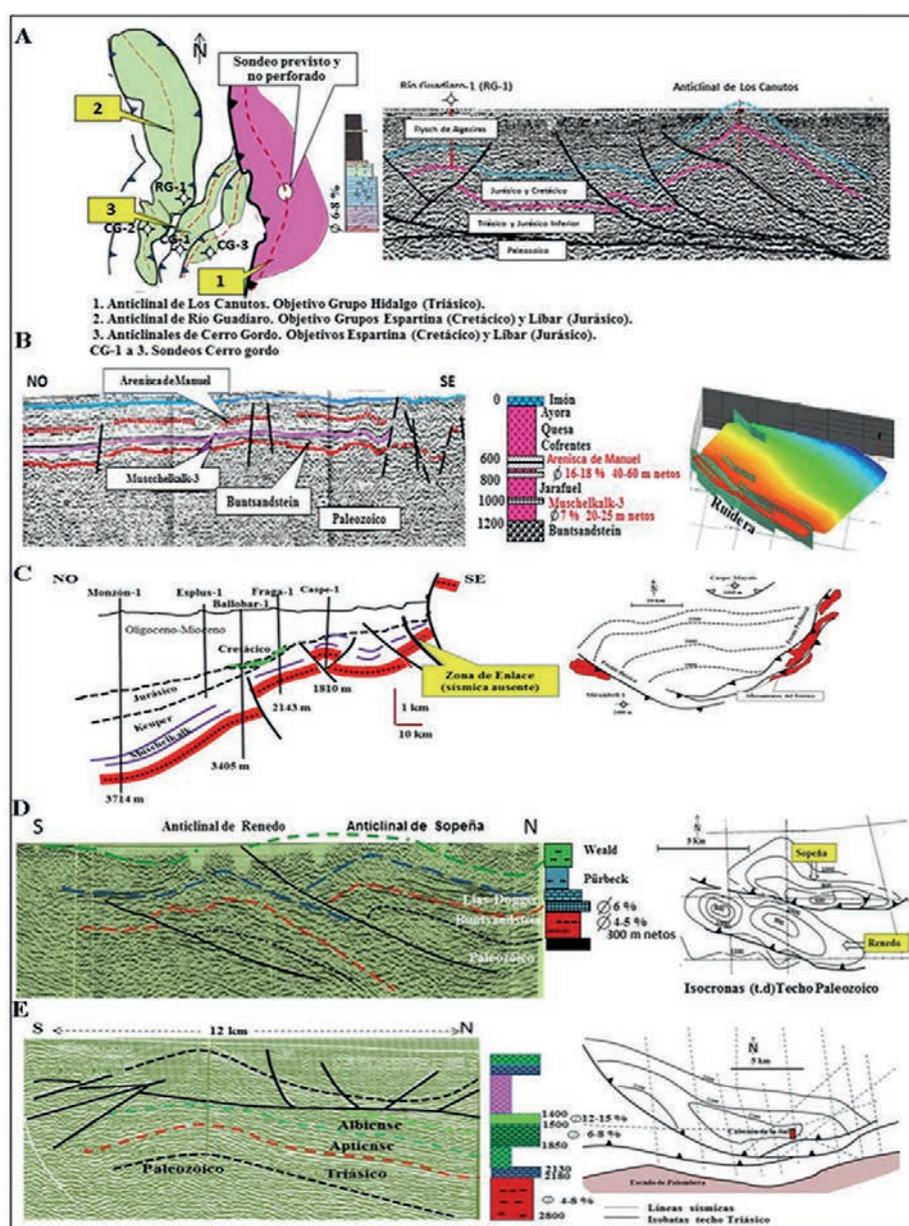
- La captura en los centros emisores y el transporte del CO<sub>2</sub> (líquido o en fase gas) hasta las trampas del subsuelo.

- Y ante todo y por último, a las facilidades operacionales brindadas por CCAA y ayuntamientos, y la legislación adecuada desde el Gobierno. Sin ellas, no se podrá ultimar la evaluación de muchas de las trampas geológicas profundas, que posible o probablemente existen y que podrían solucionar nuestro problema a un coste mucho menor que los derechos de emisión durante una, dos o tres décadas, lo que conllevaría que estos no se utilizaran, lo que es lo mismo que dejar de emitir.

La revisión de la totalidad del territorio español nos ha llevado a seleccionar ocho áreas (Fig. 5) que contabilizan el 85-90% de las emisiones españolas de CO<sub>2</sub>: Cantabria, Vascongadas, Ebro, Cataluña, Madrid, Valencia, Bajo Guadalquivir y

Almería. Ellas motivan que nuestra atención se focalice en las trampas más próximas, pues ellas abaratarían el transporte. Si se atiende al abandono, ya en marcha, de las centrales térmicas que queman carbón, se deduce que algunas o muchas de las 20 existentes deberían ser cambiadas a ciclo combinado de gas, lo que reduciría considerablemente las emisiones, pero ello no impediría que el cambio de carbón a ciclo combinado no produjese emisiones en esas mismas áreas; porque si en ellas existen térmicas de carbón es porque están necesitadas de generación de electricidad y porque al elevar drásticamente la producción desde los ciclos combinados (hoy al 10-15% de horas de trabajo) sus emisiones también aumentarían.

Nuestro consumo de electricidad ha tenido picos punta de 45.000 Mw y nuestro mix eléctrico se aproxima a una distribución tal como: nuclear, térmicas de carbón y eólica



**Fig. 16.-** Trampas en localizaciones estratégicas con diferentes riesgos de confirmación y capacidades recogidas en las figuras 10 y 11: Penibético, Renedo-Sopeña, La Mancha, Zona de Enlace y Cabezón de la Sal (modificados de: A, B y D. Oil and Gas Capital, 2010; C. ALGECO2 IGME, 2009; E. Itty y Riaza, 1985).

con 10.000 Mw cada una (30.000), hidráulica, cogeneración, ciclos combinados y solar con 5000 Mw cada una (20.000). Esta distribución indica que si en un futuro próximo abandonamos la nuclear y el carbón tendríamos un déficit de 20.000 Mw. Déficit que nuestros ciclos combinados con una potencia instalada de 24.000 Mw podrían perfectamente asumir, lo que proporcionaría:

- Una reducción del 60% de lo emitido desde las térmicas de carbón (820 contra 490g CO<sub>2</sub>-eq / kWh).
- Un incremento de las emisiones por la quema del gas natural necesario para producir los 20.000 Mw.
- Un no despreciable aumento de nuestra factura por las importaciones del mismo y un incremento de la dependencia del exterior, porque conviene no olvidar que importamos el 99,8% del gas que consumimos.

Por último, indicar que la diferencia existente entre el pago de los derechos de emisión y el secuestro, el transporte, la inyección y el control de la misma durante la vida útil de una térmica, y los programas de detalle previos y necesarios en la mayor parte de las trampas seleccionadas viene a decir que los costes de captura deberían ser del orden de 5 € inferiores a los derechos de emisión para que el secuestro amortizase los costes de detalle de la mayor parte de las trampas (4-5 M€ en sísmica 3D + 1-1,5 M€ por sondeo de inyección) y los 1,5-2 M€ año por el transporte y la operación. Y ello es válido para la mayor parte de las trampas seleccionadas y el ritmo diario de inyección.

Es decir, si queremos evitar el calentamiento hemos de pagar por ello, lo que motiva que:

- Tratemos de reducir las emisiones por todos los medios posibles.
- Trabajemos en la reducción de los costes de captura allí donde inevitablemente se produzcan emisiones.
- Y ultimemos la revisión de las trampas geológicas que las iniciativas privada o pública decidan más necesarias o favorables.

Al inicio de este texto se mostró cierto pesimismo para la consecución del objetivo fijado en París 2014, pero ahora podemos concluir que si la política de suprimir la quema del carbón para generar electricidad se lleva a cabo, cree-

mos que con los ciclos combinados a gas que existen o alguno más, si fuese necesario, se podrían mantener nuestras necesidades de electricidad cuando las renovables acusen un bache, y ello incluso si se desarrolla exponencialmente el coche eléctrico.

Dando por hecho que antes o después abandonaremos el carbón y la nuclear, e iniciaremos lo antes posible el cambio al más limpio gas natural, la distribución de las trampas geológicas necesarias para alcanzar nuestro compromiso se dulcifica sensiblemente y puede cumplirse con una parte de la distribución expresada en las figuras 10 y 17, que muestran una primera selección de las trampas geológicas recomendadas, selección realizada a partir de:

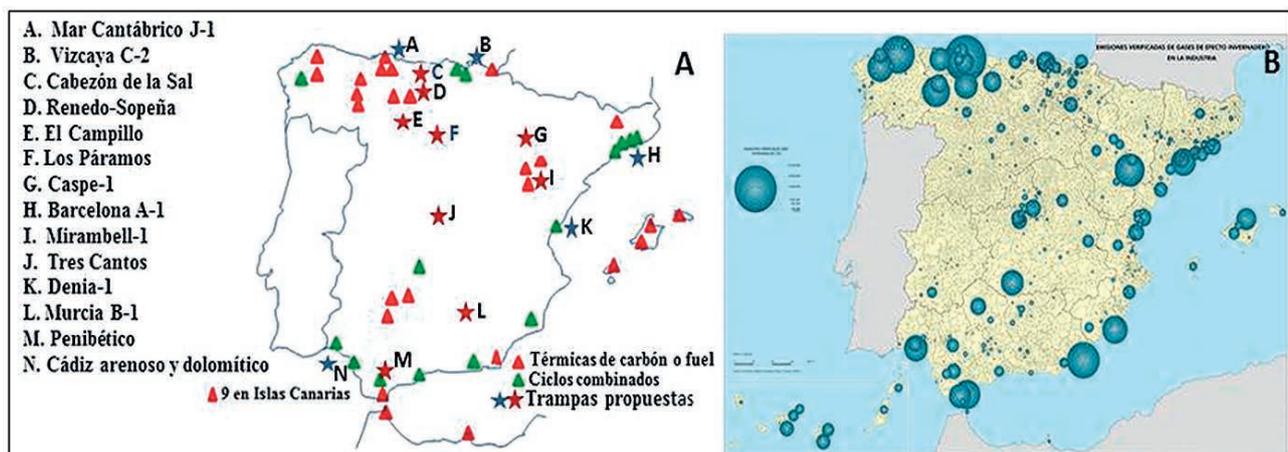
- Las áreas geográficas (Galicia, Asturias, Cantabria, Bilbao, Barcelona, León, Madrid, Valencia, Almería, Cádiz y Huelva) con mayor volumen de emisiones desde la industria y la generación de electricidad.

- Las trampas con una alta probabilidad de existencia, con aceptables capacidades de secuestro y con fáciles y económicos programas geológicos-geofísicos de detalle, tanto si son marinas como terrestres (Mar Cantábrico J-1, Vizcaya C-2, Barcelona A-1, El Campillo-1, Los Páramos, Denia-1, Murcia B-1 y Cádiz arenoso-Cádiz dolomítico).

- Las trampas con necesidad de una fase de detalle y una elevada capacidad de secuestro (Tres Cantos) o aquellas que aunque esta sea moderada se localizan en áreas críticas (Cabezón de la Sal, Renedo-Sopeña, Mirambell-1, Caspe-1 y Penibético).

Las líneas precedentes indican que nuestros mayores problemas se fijan en Galicia, Almería y en los archipiélagos de Baleares y Canarias, donde no se han encontrado trampas posibles o probables, lo que justifica que sea en ellas donde se concentre el mayor esfuerzo en el incremento de las renovables, más aún cuando sus térmicas no queman gas natural.

Y es evidente que debemos concienciarnos de que a pesar de que España sea una potencia en renovables alcanzar con ellas el 80-90% de nuestras necesidades de electricidad no parece posible en un futuro cercano.



**Fig. 17.-** A. Distribución de las centrales térmicas y localización de las 14 trampas que sea por su fiabilidad, capacidad, facilidad de los programas de detalle y proximidad a los focos emisores son propuestas en esta revisión. B. Distribución de los principales focos de emisión de España (tomado de ALGECO2 IGME, 2009).

También debemos tomar conciencia de que con los precios actuales (45 \$/Tm) por la captura de las emisiones, el secuestro de las mismas en las trampas geológicas estará siempre de 20 a 40 € por encima de los derechos de emisión, luego, si no queremos emitir, habrá que dedicar recursos a la investigación para reducir el elevado precio de captura.

Del mismo modo, la iniciativa pública o privada deberá seleccionar aquellas trampas más adecuadas en virtud de su localización, la calidad del almacén (espesor y porosidad) y la capacidad que deseablemente permita un largo tiempo de operación de la inyección, tiempo que puede cifrarse en los 50 años de vida útil de un ciclo combinado a gas.

Por último, volver a insistir en que una cosa es cumplir como país con los acuerdos de París, esfuerzo que debe liderar el Gobierno y otra muy diferente detener o aminorar un cambio climático, si al esfuerzo, por motivos económicos o por la negación de la existencia del cambio climático, no se suman los países que más emiten. En resumen, planificar el cambio y las necesidades parece una tarea que debe abordar el Gobierno lo antes posible, porque 2030 está muy cerca y los programas de detalle de las trampas geológicas no han comenzado y se consideran necesarias para evitar las emisiones que inevitablemente se producirán desde la industria y los ciclos combinados, de los que no podemos prescindir porque habrá cortos o largos tiempos en los que las energías renovables necesiten de su ayuda.

## Agradecimientos

A la editora Beatriz Bádenas por la gran dedicación que presta a la RSGE y la ayuda que ofrece a los autores durante el proceso de revisión. A José Luis García Lobón, Carlos Marín Lechado (IGME) y José Portero (CGS Ingeniería) por sus oportunas sugerencias, ayudas y transmisión de datos mientras realizábamos la evaluación de las posibilidades presentes en Béticas y Guadalquivir. A Repsol Exploración por haberme facilitado el acceso a su archivo técnico y a los revisores Alicia Arenillas y César Viseras cuyas indicaciones mejoraron el texto enviado.

## Referencias

- Abeger, G., Serrano, A., Quesada, S., 2005. Petroleum Geology of the Onshore Cantabrian Basin. En: *25 Aniversario Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo (AGGEP)*, (W. Martínez del Olmo, Ed), 155-162.
- British Petroleum, 2005. *Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- British Petroleum, 2013. *Energy Outlook*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2013.pdf>.
- Etheridge, D.M., Steele, L.P., Langfields, R.L., Barnolas, T.M., Morgan, V.I., 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over last 1,000 years from air in Antarctic ice and firm. *Journal of Geophysical Research*, 101: 4115-4128.
- IGME, 2009. Proyecto ALGECO2. <http://info.igme.es/geologia-subsuelo/AlmacenamientoCO2/Algeco2.aspx>
- International Energy Outlook, 2016. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- Itty, R., Riaza, C., 1985. Informe de implantación del sondeo Cabezón de la Sal-1. *Poster*.
- Keeling, Ch.D., 1978. The Influence of Mauna Loa Observatory on the Development of Atmospheric CO<sub>2</sub> Research. En: *Mauna Loa Observatory a 20 th Anniversary Report*, (J. Miller, Ed), NOAA Special Report, 36-54.
- Luthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T.F., 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453 (7193), 379-382.
- Mapas geológicos de España. Serie Magna, 1.50.000, IGME.
- Mapas geológicos de Andalucía, Cantabria, País Vasco y Cataluña. Eds. Comunidades Autónomas.
- Martínez del Olmo, W., 2007a. *Propuesta de Reservas del Estado para el secuestro del CO<sub>2</sub>*. Fundación para Estudios sobre la Energía, Madrid, 47 p.
- Martínez del Olmo, W., 2007b. *Una primera selección-evaluación de lugares geológicos donde inyectar el CO<sub>2</sub>*. Repsol Exploración y Fundación para Estudios de la Energía, Madrid, 166 p.
- Martínez del Olmo, W., 2008. Posibles almacenamientos de CO<sub>2</sub> 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. *Cambios climáticos y el CO<sub>2</sub>*. XVIII Curso de sondeos (Linares), Universidad de Jaén, 28 p.
- Martínez del Olmo, W., 2018. Geología, cambio climático y como tratar de aminorarlo. *XIV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales, Sevilla*, 10 p.
- Martínez del Olmo, W., 2019. The Spanish petroleum systems and the overlooked areas and targets. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (2): 289-315.
- Milankovitch, M., 1920. *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. Gauthier-Villars, Paris, 339 p.
- Ministerio para la Transición Ecológica, 2019. *Inventario Nacional de emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Informe Resumen, 6 p.
- Monnin, E., Indermühle, A., Dällenbach, A., Flückiger, J., Bernhard, S., Stocker, T.F., Raynaud, D., Barnola, J.M., 2001. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the last glacial termination. *Science*, 291: 112-114.
- Motis, K., Grandia, F., Creodz, A., Martínez del Olmo, W., 2012. Un área potencial para almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: Los Páramos (Burgos). *VIII Congreso Geológico de España, Oviedo*, 10 p.
- Pagani, M., Zachos, J.C., Freeman, K.H., Tiple, B., Bohaty, S., 2005. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene. *Science*, 309: 600-603.
- Paillard, D., 2010. Climate and the orbital parameters of the Earth. *Comptes Rendus Geoscience*, 342 (4-5): 273-285.
- Pearson, P.N., Palmer, M.R., 2000. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 406: 695-699.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barko, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M., 1990. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.

- Pomar, L., Ward, W.C., 1995. Sea-level changes, carbonate production and platform architecture: the Lluçmajor Platform, Mallorca, Spain. En: *Sequence Stratigraphy and Depositional Response to Eustatic, Tectonic and Climatic Forcing*, (B.U. Haq, Ed). Kluwer Academic Press, 87-112.
- Pomar, Ll., 2018. El CO<sub>2</sub> no causa el calentamiento global. *Heraldo de Aragón*, 13-9-2018.
- SCCUN., 2016. *Emisiones mundiales por sectores, evolución y perspectivas*. Secretaría de Cambio Climático de Naciones Unidas. <https://unfccc.int/es>.
- Termuehlen, H., 2001. *100 years of power plant development: focus on steam and gas turbines as prime movers*. ASME Press, New York, 208 p.
- Tripathi, A.K., Roberts, C.D., Eagle, R.A., 2009. Coupling of CO<sub>2</sub> and ice sheet stability over major climate transitions of the last 20 million years. *Science*, 326: 1394-1397.
- Vallaure, T., Mallo-García, J., 2005. Metodología para un estudio de viabilidad de inyección de CO<sub>2</sub> en el Campo Casablanca, Mediterráneo, España. En: *25 Aniversario Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo (AGGEP)*, (W. Martínez del Olmo, Ed), 169-177.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 millions years to present. *Science*, 292: 686-693.
- Zapatero, M.A., Martínez del Olmo, W., 2008. Confinamiento del CO<sub>2</sub>. En: *El futuro del carbón en la política energética española*. Fundación para estudios sobre la energía, Madrid, 219-225.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 3-6-2019

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 10-9-2019

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 24-9-2019