



# MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

MAPA DE RUTA  
TECNOLÓGICA DE  
CCUS EN MÉXICO

---

Elaborado por

Secretaría de Energía

con la participación de:

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Petróleos Mexicanos

Comisión Federal de Electricidad

Centro Mario Molina

Instituto Politécnico Nacional

Universidad Nacional Autónoma de México

Marzo de 2014

## ÍNDICE

Introducción	01
Objetivos	03
Etapas del MRT	05
I.- Incubación	05
II.- Política pública	09
III.- Planeación	12
IV.- Fases de escala piloto y demostrativa	16
IVa.- Proyectos Piloto en la Industria de los Hidrocarburos	16
IVb.- Proyecto Piloto en la Generación de Electricidad	20
IVc.- Proyecto Demostrativo	21
V.- Escala Comercial	24
Referencias Bibliográficas	31



## INTRODUCCIÓN

Desde el año 2008 el país ha emprendido diversas acciones con la intención de poder implantar la tecnología de Captura, Uso y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCUS, por sus siglas en inglés -carbon capture, use and storage-), sin embargo, se cree pertinente ordenar los esfuerzos realizados y planear mejor los que se deberán hacer a futuro, con el objetivo de optimizar los resultados y obtener sus beneficios lo antes posible.

La Ley General de Cambio climático eleva a ordenamiento de carácter legal varias medidas tendientes a combatir en el país las causas del cambio climático, entre otras:

- Garantizar el derecho a un ambiente saludable.
- Definir acciones concurrentes en materia de cambio climático en los tres órdenes de gobierno.
- Reducir la vulnerabilidad del hombre y los sistemas naturales por el cambio climático.
- Regular las acciones de adaptación y mitigación.
- Promover la investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación en la materia.
- Facilitar la transición hacia una economía competitiva y sostenible de bajas emisiones de carbono a la vez que se promueven sus beneficios ambientales, sociales y económicos.

Por esa razón, la Secretaría de Energía (SENER) consideró conveniente garantizar la marcha ordenada de dicho proceso, a través de conformar y oficializar el Mapa de Ruta Tecnológica (MRT) de CCUS en México. Para dicho efecto se ha conformado un equipo de trabajo encabezado por SENER y SEMARNAT y la participación primordial de PEMEX, CFE, UNAM, IPN y el Centro Mario Molina (CMM) para contar con dicho Mapa en el menor tiempo posible.

## CAMBIO CLIMÁTICO

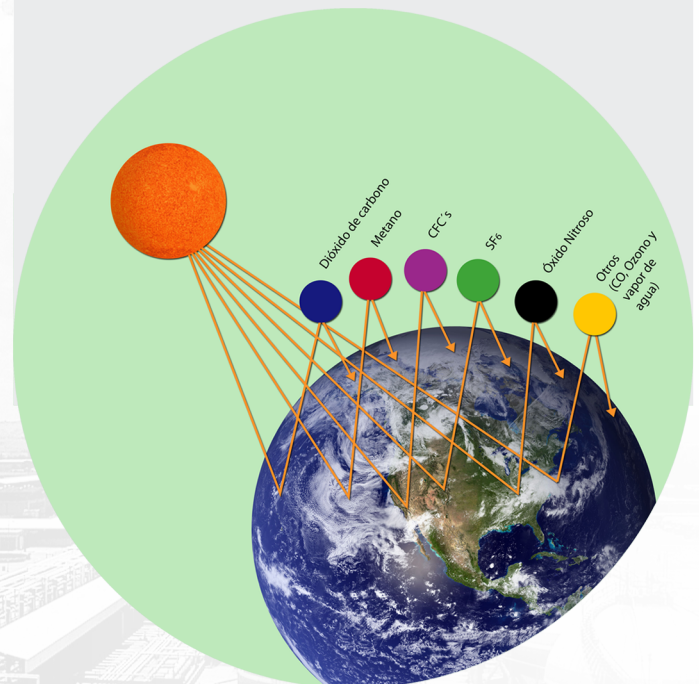
El cambio climático es la variación en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima, observado en periodos comparables.

La principal causa del cambio climático es el efecto invernadero que causan algunos gases propios de nuestra atmósfera, por lo que es un fenómeno que ocurre de manera natural e indispensable para mantener una temperatura superior al punto de congelación, sin embargo, las cantidades de dichos gases, ha superado con mucho la que debiera existir en forma natural. El origen de estos gases en cantidades adicionales es la actividad humana principalmente.

Los Gases de Efecto Invernadero son principalmente dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono, clorofluorocarbonos y hexafluoruro de azufre y en menor medida el vapor de agua, el ozono y el monóxido de carbono.

La concentración excesiva de estos gases produce el desequilibrio en el balance energético de la Tierra.

Fuente: SEMARNAT. Ley General de Cambio Climático. Junio 2012. México



Fuente: Blasing et. al. 2013

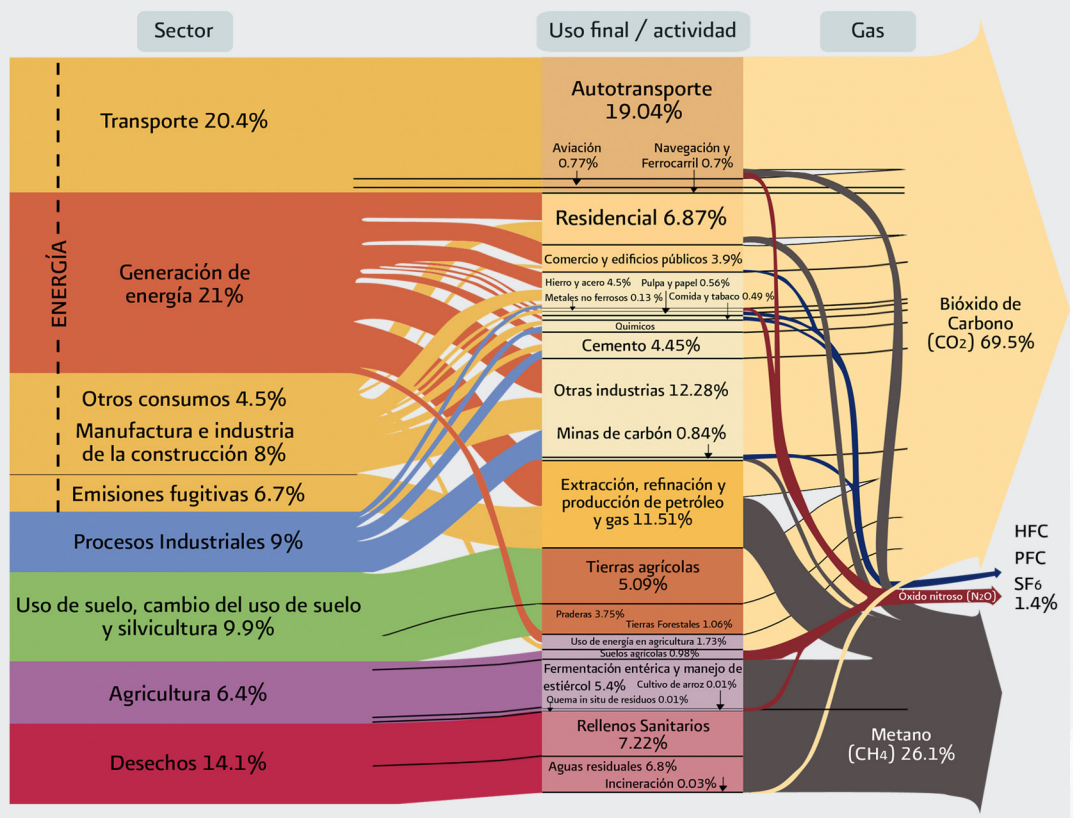
# MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

## LOS GEI EN MÉXICO, PRINCIPALES SECTORES

El consumo de combustibles fósiles para la generación de energía y el transporte predominan como fuentes mayoritarias de emisiones.

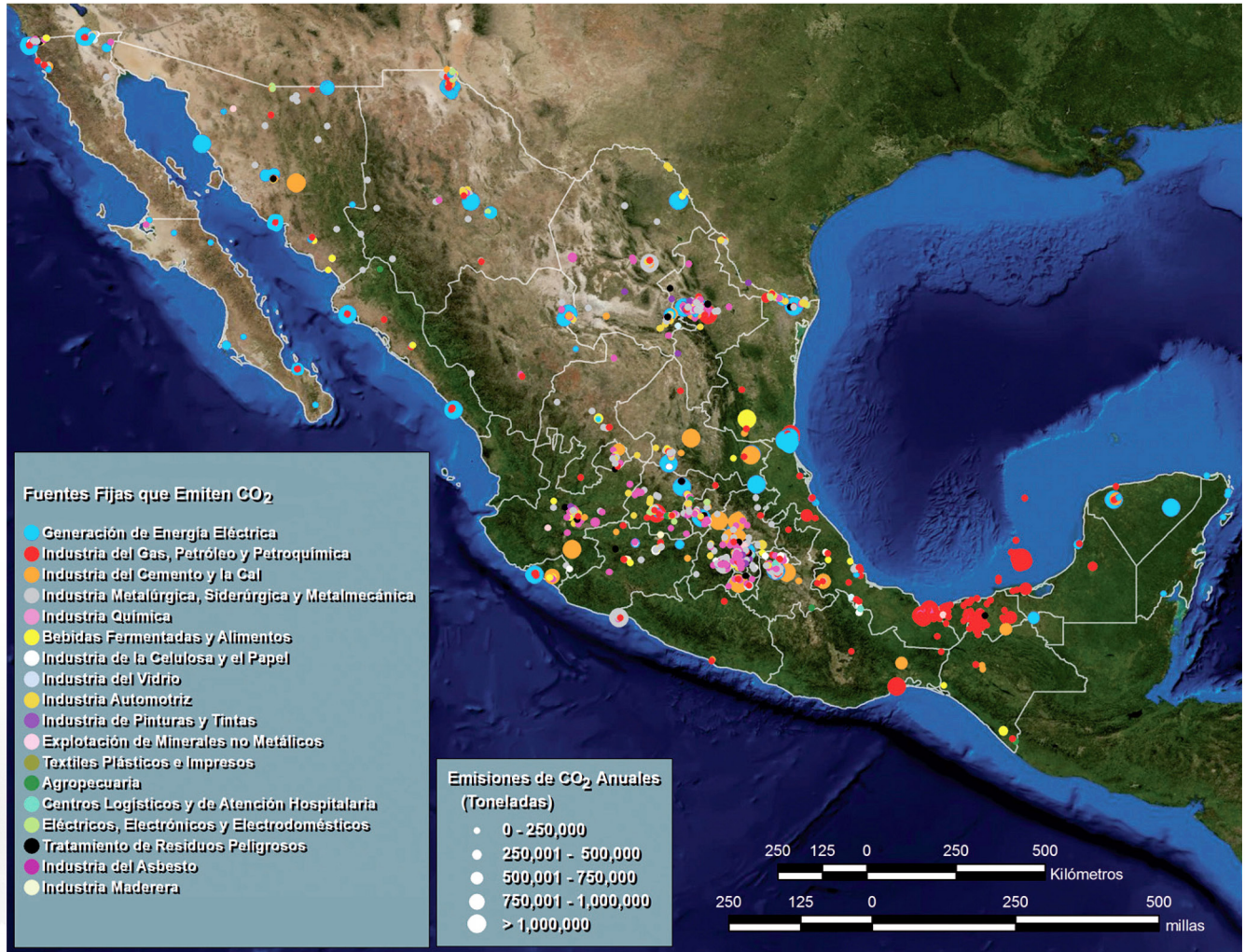
El sector de la energía prevalece como la principal fuente fija de emisiones de GEI en México y el mundo.

En la figura se resume la contribución por categoría de emisión en México.



Fuente: INE, 2006

PRINCIPALES FUENTES FIJAS EMISORAS DE GEI EN MÉXICO



Fuente: SENER / CFE, 2012

## OBJETIVOS

- Diseñar la ruta crítica oficial de CCUS, desde su incubación hasta la implementación a escala comercial.
- Constituir una base sistémica y ordenada que permita gestionar recursos etiquetados para asimilar la tecnología de CCUS en el país.
- Promover incentivos económicos y regulatorios para la implantación de la tecnología.
- Promover las transacciones de emisiones y mercados de carbono en los que México pueda participar, así como facilitar el flujo de recursos y apoyos internacionales.
- Articular las actividades productivas y de investigación en temas regulatorios, de captura, transporte, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> con la intención de optimizar su desarrollo.



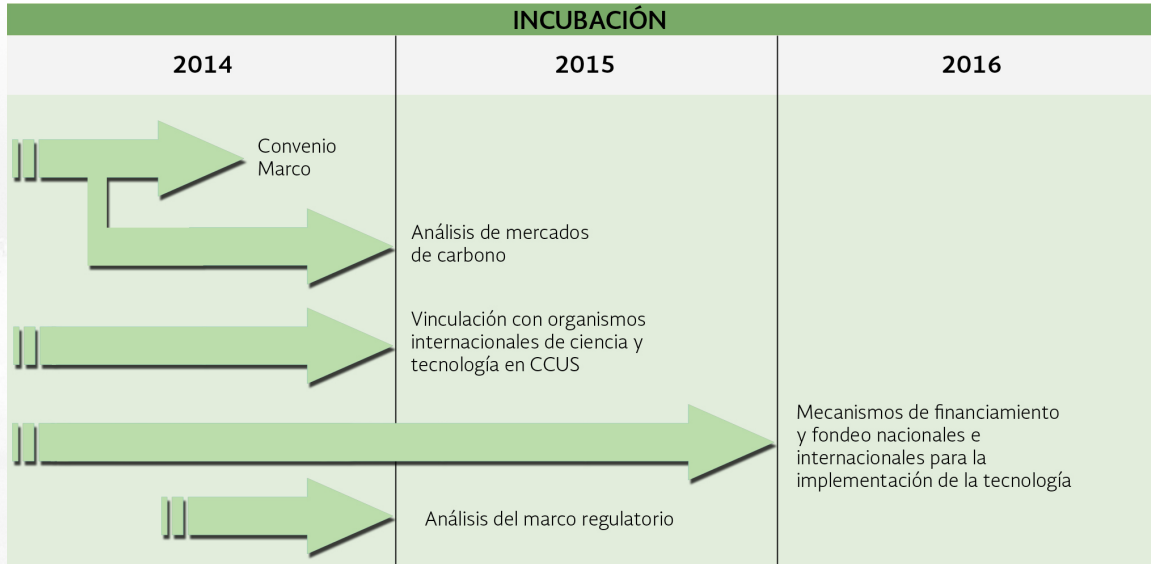
## ETAPAS DEL MRT

Se ha considerado que todas las actividades, ordenadas en el tiempo, que permitirán el uso de la tecnología de CCUS se pueden agrupar en seis etapas, que cronológicamente se describen a continuación. En el gráfico de la página anterior se muestran sus relaciones en el tiempo<sup>1</sup>.

### I.- Incubación.

Representa al grupo de acciones estratégicas que se deben emprender en forma previa a la implementación de una Política Pública. Los elementos de esta política deben estructurarse con suficiente tiempo por lo que se requiere una etapa de incubación que permita llevar a cabo las acciones que adecuen el ambiente nacional para la asimilación de la tecnología. Representa una etapa precursora de las acciones que en el futuro serán sistémicas ya que formarán parte de programas regulares de diferentes instituciones.

MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA  
USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



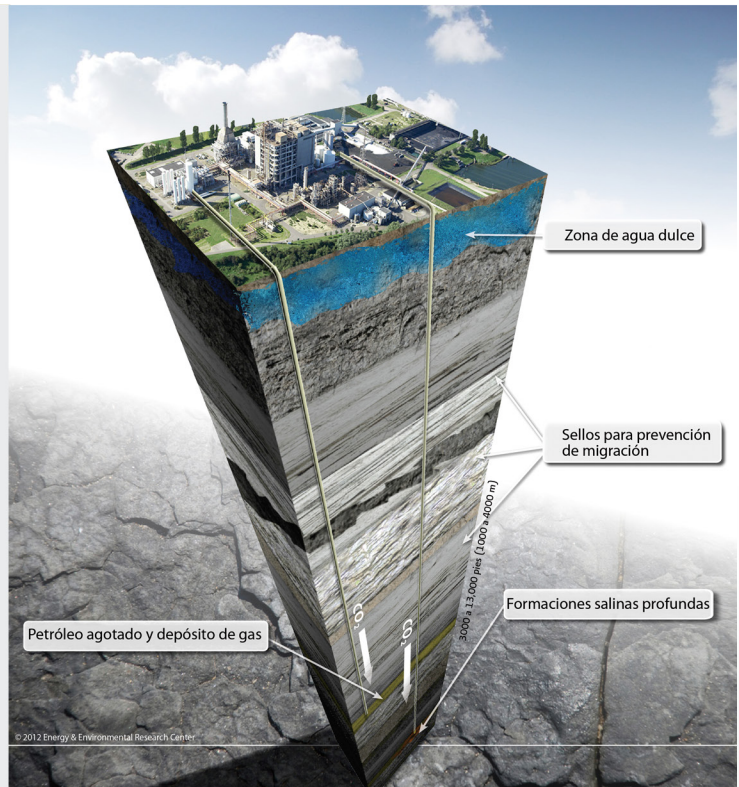
<sup>1</sup> En la página anterior se muestra una versión resumida del Mapa de Ruta Tecnológica en su expresión gráfica. Al final del documento se muestra la versión extendida.

## LA TECNOLOGÍA DE CCUS

La Tecnología de CCUS (Carbon Capture, Use and Storage por sus siglas en inglés) es en realidad un conjunto de aplicaciones tecnológicas con el propósito de reducir las emisiones de carbono en la atmósfera, capturando el CO<sub>2</sub> y almacenándolo en el subsuelo de manera segura y permanente. Puede ser en depósitos agotados de petróleo, en formaciones muy profundas de agua con alto contenido salino o en mantos de carbón sin interés económico.

Se sabe que el CO<sub>2</sub> es uno de los gases de efecto invernadero más abundantes en nuestra atmósfera y está favoreciendo el calentamiento global originado en gran parte, por la quema de combustibles fósiles. Las energías alternativas, aunque tecnológicamente son cada vez más refinadas y su crecimiento es optimista, aún no están disponibles en la cantidad y rentabilidad que fuera deseable como para sustituir a los hidrocarburos.

Es por eso que la tecnología CCUS está llamada a ser una solución importante a la necesidad de usar combustibles fósiles. Esta tecnología se ha desarrollado con muy buenos resultados en varios países. En México puede tener una contribución importante, pues los combustibles fósiles en México son la base del desarrollo de la industria y la economía.



Fuente: Peck et. al. 2012

Las siguientes son sus fases más importantes:

**Convenio Marco.** Éste se establece entre SENER y SEMARNAT, que son las instituciones regulatorias por una parte, y PEMEX y CFE como la industria principalmente implicada por la otra. Esta fase es necesaria, dado que en forma previa no existe una política pública al respecto y por lo tanto, recursos

que hagan posible llevar a cabo las acciones mínimas para la adopción del concepto tecnológico en el país. Uno de los objetivos concretos de dicho Convenio, será el establecer los compromisos de CFE y PEMEX para lograr a mediano plazo, un proyecto integrado de CCUS aprovechando el CO<sub>2</sub> de una central termoeléctrica para la recuperación mejorada de hidrocarburos.

**Análisis de Mercados de Carbono.** Se refiere a analizar el panorama a corto, mediano y largo plazos, sobre las relaciones que imperarán en México y el mundo tanto de los precios de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, como de las penalizaciones por su emisión a la atmósfera. Es importante en principio, adoptar la tecnología de captura y almacenamiento de carbono, misma que no es rentable si no existen mecanismos que fomenten su aplicación aunque los avances tecnológicos seguramente cambiarán el escenario

futuro. Por tanto, es necesario un análisis de dichos escenarios mientras se da tal condición y considerar en esta etapa la adopción o diseño para implementación de mecanismos de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) para cuantificar el CO<sub>2</sub> que se está capturando efectivamente y garantizar que se mantiene en los reservorios de manera “permanente”, de acuerdo con los estándares internacionales para poder acceder a mecanismos de fondeo, financiamiento y mercados de carbono.

## ETAPAS DEL PROCESO DE CCUS

La tecnología del secuestro de carbono (CCUS) o almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> debe de seguir una secuencia de procesos con el objetivo de asegurar el almacenamiento del dióxido de carbono extraído de fuentes emisoras puntuales o estacionarias e inyectadas en formaciones geológicas profundas. Dichos procesos se ilustran en la figura siguiente.

Los gases de efecto invernadero emitidos por las fuentes estacionarias son capturados, y como no están compuestos en su totalidad por CO<sub>2</sub>, éste debe ser separado y enriquecido. Posteriormente es comprimido para hacer más eficiente su transporte. El CO<sub>2</sub> puede ser transportado en tierra por medio de tuberías, pipas o trenes y en mar por medio de buques. Para su inyección se requiere que se esté en condiciones de presión y temperatura que hagan óptimo su manejo.

Para el proceso de almacenamiento se han considerado sitios en donde existan rocas que tenga el volumen necesario de espacios vacíos para aceptar una cantidad importante de CO<sub>2</sub>. Estos espacios vacíos deben estar interconectados para captar el CO<sub>2</sub>, al ritmo en el que es inyectado desde superficie y que existan las condiciones necesarias para prevenir la fuga o retorno inadvertido a superficie o acuíferos.

Los proyectos de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> requieren actividades de monitoreo en las fases previas a la operación, durante la operación e incluso después del cierre, así como análisis de riesgos y desarrollo de estrategias de mitigación que tiene que ser implementadas en caso de que exista una fuga. La aplicación efectiva de las tecnologías de monitoreo dan la seguridad de los proyectos, con respecto a la salud humana y al impacto ambiental.



## MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

---

**Vinculación con Organismos Internacionales de Ciencia y Tecnología en CCUS.** En México son escasos los conocimientos relacionados con la tecnología de CCUS. Es necesario llevar a cabo los vínculos suficientes con instituciones de ciencia y tecnología internacionales que la dominen, con la intención de que pronto los técnicos mexicanos sean capaces no sólo de operar instalaciones de CCUS sino de garantizar el monitoreo de los sitios para asegurar el almacenamiento a perpetuidad. Ésta es una línea de acción temporal ya que México deberá ser capaz de desarrollar sus propios recursos humanos en el tema en el mediano plazo. Esta etapa debe encaminarse a capacitar a los primeros técnicos, mismos que en el futuro próximo serán los trasmisores de la tecnología a otros técnicos nacionales, ya sea desde la industria o el aula.

**Mecanismos de Financiamiento y Fondo Nacionales e Internacionales para la Implementación de la Tecnología.** El CCUS es una tecnología demandante de recursos económicos elevados, por lo que se requiere la vinculación de la Secretaría de Hacienda y Crédito

Público desde el inicio de su desarrollo. Esta es la razón por la que actualmente sólo se lleva a cabo en países desarrollados. Incluso en estos, es necesaria la participación de centros de investigación, la industria y organismos financieros internacionales con enfoque de sustentabilidad para continuar la marcha del desarrollo del concepto. Sin embargo, al ser el Cambio Climático un grave problema global, sin importar quién produce las emisiones, existen mecanismos internacionales encaminados a facilitar los medios para el desarrollo de tecnologías para la mitigación de los efectos del cambio climático o su previsión, como es el caso del CCUS. México ya está recibiendo algunos beneficios de dichos mecanismos, sin embargo, estos no son suficientes. Además de la necesidad de mejorar en cuanto a suficiencia, deberán sostenerse por algunos años más, en tanto el precio del carbono no se haga más atractivo o descendan los costos de los insumos tecnológicos del CCUS o ambos. Esta última parte pudiera considerarse como una continuación de la etapa de implementación y abordarse desde la Etapa de Políticas Públicas.



**Análisis del Marco Regulatorio.** Almacenar permanentemente el CO<sub>2</sub> en el subsuelo trae consigo una serie de responsabilidades que hay que delimitar y deslindar. Aunque los países que mantienen el liderazgo en el desarrollo del CCUS aún tienen indefiniciones, han dado forma en lo elemental al marco que permite el manejo del CO<sub>2</sub>, sus formas de secuestro y las obligaciones y responsabilidades de la vigilancia del comportamiento una vez almacenado. México no cuenta aún con dichas adecuaciones a su normatividad, por lo que deberá hacer un diagnóstico de todas aquellas regulaciones que habría que actualizar o crear para asegurar la correcta y segura aplicación de la tecnología, delimitar los alcances y obligaciones de capturadores, transportadores y almacenadores, y derechos sobre el uso del CO<sub>2</sub>. Así como la definición de la pertenencia de las reducciones de emisiones y responsabilidades para su correcto almacenamiento cuando la captura la realice un actor y el almacenamiento un actor diferente.

## II.- Política Pública.

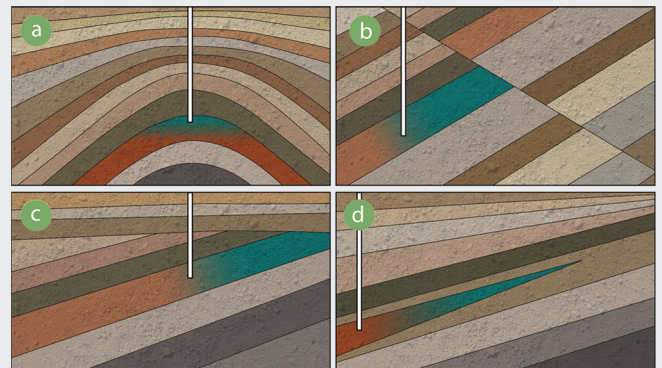
Una vez iniciada la Etapa de Incubación y el logro de sus primeros avances, se debe dar inicio a la conformación de las Políticas Públicas en materia del uso y secuestro del CO<sub>2</sub>. Éstas tendrán el objetivo de garantizar el marco de seguridad del uso de la tecnología, la sustentabilidad de su desarrollo y la disponibilidad de recursos económicos que garanticen el cumplimiento de las metas que se establezcan.

Como se ha mencionado y de acuerdo con la Ley General de Cambio Climático, es probable que en México se vayan incorporando políticas de reducción de gases de efecto invernadero y sus precursores, alineadas a los objetivos voluntarios del país. En la medida que los plazos de los objetivos voluntarios del país se acerquen, será cada vez más necesario instrumentar políticas que permitan valorizar más agresivamente las emisiones y reducciones de emisiones de GEI y sus precursores. Dichas políticas buscarán alinearse a los intereses nacionales y las mejores prácticas para favorecer la adopción de alternativas tecnológicas como CCUS y mejorar su costo beneficio. Las fases que componen esta etapa Política Pública se describen brevemente a continuación.

## MODOS DE ALMACENAMIENTO

Una vez inyectado el CO<sub>2</sub> en una unidad geológica porosa y permeable, este permanecerá en la misma por medio de procesos físicos y químicos que lo atraparán, denominados mecanismos de entrapamiento, los cuales se clasifican de la siguiente manera.

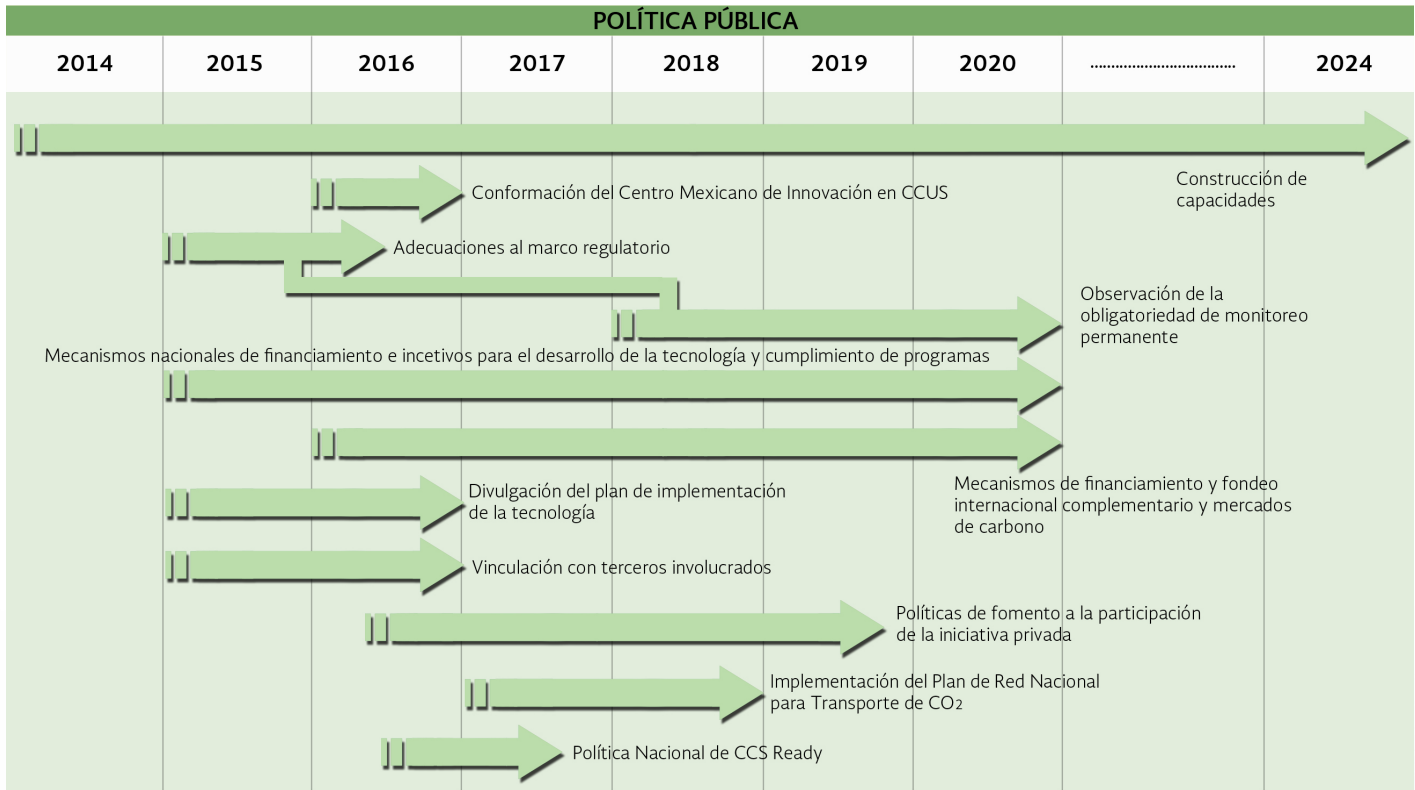
**Físicos:** Trampas que aíslan el CO<sub>2</sub> inyectado, por ejemplo, las rocas se pliegan debido a los esfuerzos existentes en la corteza, estos pliegues pueden ser utilizados, siempre y cuando en la parte superior de los mismos se encuentren rocas impermeables. O debido a los esfuerzos en la corteza las rocas se rompen y desplazan en bloques; en este tipo de desplazamientos pueden juntarse bloques de roca permeable en la cual pueda ser inyectado el CO<sub>2</sub> y bloques de roca impermeable que impida el desplazamiento del gas. Estas trampas se llaman de tipo estructural. De manera natural también se encuentran en contacto rocas permeables e impermeables cuando las condiciones de formación de la roca cambian de un lugar a otro, por lo cual cambia tanto la composición como las texturas de las rocas, aspecto denominado cambio de facies. Cuando un cambio de facies permite el almacenamiento de CO<sub>2</sub> se le denomina trampa estratigráfica. Estos modos de entrapamiento estructural y estratigráfico se muestran en la figura inferior.



**Químicos:** A profundidad las rocas disminuyen sus posibilidades de poseer espacios vacíos, ya que casi todos los huecos se encuentran rellenos de algún fluido, por lo general agua. Cuando se inyecta el CO<sub>2</sub>, éste se disuelve en el fluido anfitrión, este es un mecanismo conocido como entrapamiento por solubilidad. Otra manera de almacenamiento es cuando el CO<sub>2</sub> reacciona químicamente con los minerales de la roca en la que se inyectó, formando y precipitando nuevos minerales; proceso denominado entrapamiento mineral. De esta manera se consume todo el CO<sub>2</sub>, sin embargo este último mecanismo, sobre todo, se lleva a cabo en un lapso de tiempo muy largo, del orden de miles de años.

MAPA DE RUTA  
TECNOLÓGICA DE  
CCUS EN MÉXICO

MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA  
USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



**Construcción de capacidades.** Aunque han existido esfuerzos para difundir el conocimiento del manejo y aplicación del CCUS se requiere acelerar la difusión del conocimiento y capacidades a través de programas universitarios regulares y posgrados. Se deben adecuar los programas de estudio de las carreras profesionales de las disciplinas necesarias, al igual que acudir al desarrollo de planes coordinados de becarios en el extranjero y cursos específicos impartidos por autoridades internacionales para el corto plazo y nacionales en el mediano y largo plazo.

**Adecuaciones al Marco Regulatorio.** Una vez que el análisis del marco regulatorio se concluya como parte de las actividades de la Etapa de Incubación, se debe dar lugar a la adecuación de las regulaciones que sean necesarias y la generación de aquellas de las que se carezca para el correcto desarrollo de la tecnología de CCUS. Conviene privilegiar en el programa cronológico de esta fase, aquellas regulaciones que se necesitan para abordar la etapa de proyectos piloto, en el corto plazo, seguido por aquellas necesarias para cubrir la

etapa de proyectos demostrativos y terminando con la etapa de escala comercial.

**Observación de la Obligatoriedad de Monitoreo Permanente.** Una política pública esencial en el CCUS es la que se deriva de las obligaciones de quien almacena CO<sub>2</sub> antropogénico en el subsuelo. Esta fase es tal vez una de las más delicadas pues en ella recae la confianza de la sociedad en la seguridad del almacenamiento geológico. Dicha política debería ser suficientemente oportuna como para garantizar su existencia para cuando se hagan los primeros secuestros geológicos, desde los proyectos piloto, aunque su importancia definitiva está en la operación de proyectos a escala comercial.

**Divulgación del Plan de Implementación de la Tecnología.** La sociedad debe estar enterada de los planes de la implementación del CCUS en el país. El pasar por alto esta fase puede dificultar seriamente conseguir la adopción de la tecnología. La divulgación debe hacerse en todos los ámbitos y usando los

principales y mejores medios posibles. Es necesario divulgar el concepto a la juventud, en los congresos, a los gobiernos locales y a las asociaciones civiles, sobre todo aquellas de orientación de sustentabilidad. En los países en que se usa la tecnología CCUS esta fase tomó varios años y no con pocas dificultades. Es recomendable abordar este tema como uno de los más inmediatos de la política pública en la materia.

**Vinculación con Terceros Involucrados.** La industria cementera, siderúrgica y química, así como la petrolera y eléctrica, la academia, las instituciones de investigación y las asociaciones gremiales de tópicos relacionados con el CCUS, deben vincularse en el compromiso de desarrollar la tecnología en México. Este es un reto importante que sólo se podrá sostener con éxito si forma parte de una política pública y que entre en funcionamiento oportunamente.

**Políticas de Fomento a la Participación de la Iniciativa Privada.** La tecnología de CCUS es demandante de elevados recursos económicos. Por sí misma no es atractiva para la iniciativa privada salvo en casos muy específicos que de momento no tienen lugar en nuestro país. Por lo tanto, deberá formar parte de las políticas públicas en esta materia, para crear mecanismos que hagan atractiva la adopción de la tecnología de uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. De lo contrario, su implementación demorará más de lo conveniente y podrá generar reacciones en su contra.

**Implementación del Plan de Red Nacional para Transporte de CO<sub>2</sub>.** Una de las acciones que ayudarán de forma importante a hacer atractiva la implementación de la tecnología, es poder ofrecer el CO<sub>2</sub> en cantidades suficientemente importantes como para ser considerado como insumo confiable en algunas industrias, como la de recuperación mejorada de hidrocarburos. Esto se logra si se puede construir una red de carbonoductos que faciliten el transporte del CO<sub>2</sub> desde lugares aislados del país, y probablemente donde no hay sitios cercanos de inyección con interés económico, hacia regiones de México o el extranjero donde sí lo sea (USA principalmente). De otra forma, pensar en los sitios emisores como atractivos en lo individual será un error. Una política respecto a este tema, debería ser diseñada con la anticipación suficiente tomando como base el análisis del mercado de carbono llevado a cabo en la Etapa de Incubación.

**Política Nacional de CCS Ready.** Actualmente las industrias fijas emisoras de CO<sub>2</sub> en México no están listas para adoptar un esquema de captura sin que se haga necesaria una reconfiguración importante y cara. Por ello, en forma oportuna deberá surgir una política pública que regule el que las nuevas instalaciones, nazcan desde origen, listas para adaptarse a un esquema de captura. Este concepto se llama CCS Ready y aunque implica una inversión adicional importante, que se reflejará en los costos de producción, conlleva costos mucho menores a aquellos que se enfrentarán si no se planean así desde su origen y siempre tendrán que ser objeto de reconfiguraciones, sobre todo cuando el uso de esquemas de captura se vaya turnando cada vez más vinculante.

**Mecanismos Nacionales de Financiamiento e Incentivos para el Desarrollo de la Tecnología y Cumplimiento de Programas.** En la Etapa de Incubación se mencionó la necesidad de acceder a fondos internacionales para dar inicio al uso de la tecnología en el país. Sin embargo, las inversiones de infraestructura en la materia deben ser efectuadas por los recursos presupuestarios nacionales. De otra forma no será posible dar continuidad a las metas que se establezcan. Tal vez uno de los objetivos más importantes de organizar la detonación de la tecnología en el país, sea obtener el reconocimiento de su vital importancia tanto por las autoridades hacendarias, como por los congresos y lograr así la asignación constante de los recursos económicos necesarios.

**Mecanismos de Financiamiento y Fondo Internacional Complementario y Mercados de Carbono.** Además de los fondos internacionales para la adopción de la tecnología CCUS abordados en la etapa de Incubación, y los de origen nacional dedicados al desarrollo, ya no como implementación si no como medio definitivo y clave para facilitar la



## MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

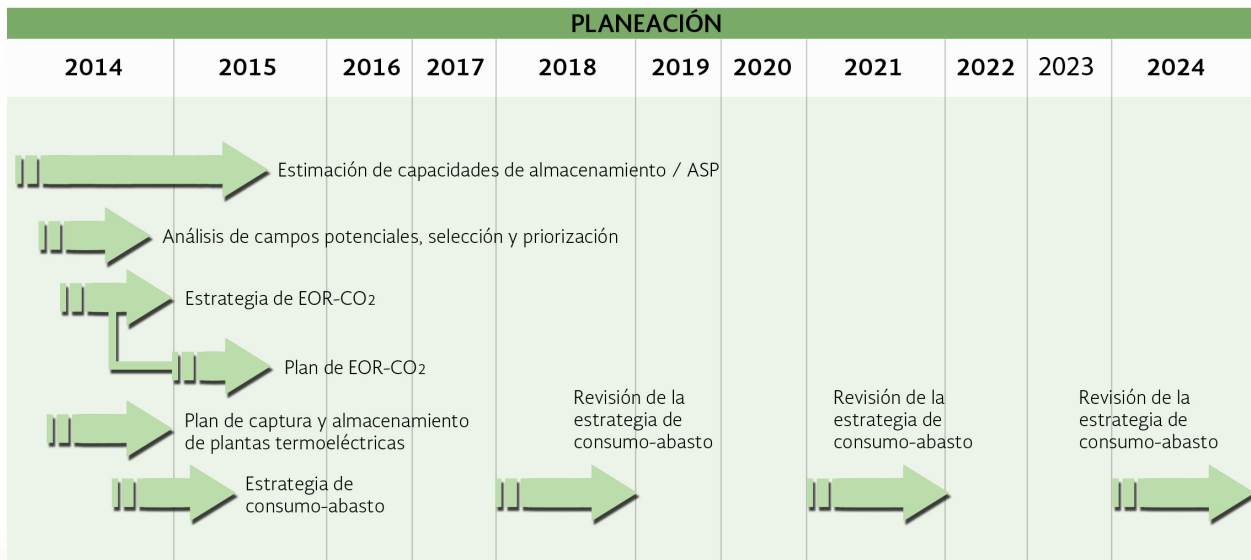
transición energética, será necesaria la participación de mecanismos internacionales dedicados al combate de los efectos de los gases de efecto invernadero, que se anticipa que en el futuro no sólo existirán, sino que serán mayores a los actuales en la medida en que las metas anuales de mitigación no se acerquen a lo programado. Es necesaria una política pública al respecto no sólo para acceder sistemáticamente a esos fondos, sino para crear en el país las condiciones que aseguren el derecho al otorgamiento de los mismos.

**Conformación del Centro Mexicano de CCUS.** Deseablemente la tecnología de CCUS será dominada en el país tarde o temprano, sin embargo, se hará necesario constituir un centro estratégico en innovación en el tema que permita garantizar la independencia tecnológica como medio de mejorar la oportunidad, el diseño, los costos de construcción y operación de infraestructura de CCUS.

### III.- Planeación.

Hay un grupo de actividades de planeación que se deberán desarrollar en forma conjunta entre las dos principales industrias emisoras de CO<sub>2</sub> (hidrocarburos y generación de electricidad), con el objeto aumentar las posibilidades de hacer de la industria del secuestro geológico del carbono, una industria económicamente viable. La generación de electricidad como principal productora de emisiones de CO<sub>2</sub>, y la industria de la Recuperación Mejorada de Hidrocarburos como ente receptor de las emisiones de la industria eléctrica principalmente, al igual que las propias. Este proceso iterativo de planeación deberá desarrollarse y revisarse sistemáticamente como base de la optimización del ciclo emisión-captura-almacenamiento que puede irse modificando en el tiempo, a la luz de los avances tecnológicos y el precio del carbono, entre otros factores.

### MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



**Plan de Captura y Almacenamiento en Plantas Termoeléctricas.** La industria de generación de electricidad como principal emisora de CO<sub>2</sub> en el país (y en el mundo) debe dar los primeros pasos para adoptar la tecnología de secuestro geológico. Sin embargo, dado que por sí misma, no es capaz de hacerlo en forma rentable, es necesario asociarla a un uso económico del bióxido de carbono, como la Recuperación Mejorada de Hidrocarburos, por lo que, independientemente del dominio de la tecnología en su parte de captura, el CCUS en la industria eléctrica debe desarrollarse pensando en asociarse a la industria de los hidrocarburos, amén de la investigación que deba realizar para localizar sitios de almacenamiento en acuífero salino, ya sea para periodos de emergencia cuando no exista la forma de vender el CO<sub>2</sub> a una industria que lo use como insumo, como para cuando las condiciones tecnológicas y de precio del carbono sean tales como para que lo hagan atractivo por sí mismo.

**Estimación de Capacidades de Almacenamiento en Acuíferos Salinos Profundos.** Este es un concepto en el

que se tienen algunos avances en el país, pero aún no son suficientes. Se debe continuar inventariando el subsuelo profundo del país hasta conocer lo mejor posible todos aquellos lugares del territorio nacional que admitirían en forma segura y permanente, el almacenamiento del bióxido de carbono de origen antropogénico. Esto en medios geológicos del tipo denominado formaciones acuíferas salinas profundas. Se debe aspirar a tener un censo geológico del subsuelo tal, que un día la planeación de la construcción de una cierta industria emisora de CO<sub>2</sub> tome en cuenta la cercanía con un reservorio de este tipo en el subsuelo, minimizando así los costos de transporte de las emisiones. Este tipo de reservorio, aunque no produce un subproducto con valor económico, como es el caso el EOR (Recuperación Mejorada de Hidrocarburos por sus siglas en inglés -Enhanced Oil Recovery-), es considerado el más común de los medios de almacenamiento a largo plazo y en volumen, el que ofrece las mayores capacidades como para secuestrar geológicamente todas las emisiones de bióxido de carbono de la humanidad.

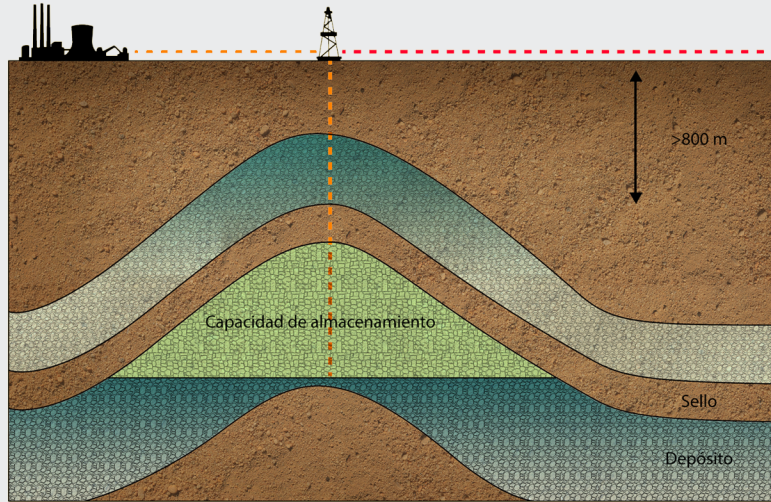


## ESTIMACIÓN DE CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO EN MÉXICO

Se considera que para almacenar el CO<sub>2</sub> se requiere una roca porosa y permeable a suficiente profundidad, y que además esté cubierta por una roca impermeable que conforme una estructura segura que impida la fuga de gas atrapado. Entonces, es necesario determinar en qué parte del territorio se cuenta con tales condiciones.

En el 2011 se llevó a cabo un estudio a nivel País donde se determinaron las áreas que reúnen características favorables para almacenar CO<sub>2</sub> y se conformó un mapa con zonas de inclusión y exclusión, y para conocer la Capacidad Teórica de Almacenamiento. Se analizaron secciones regionales a lo largo de 11 provincias geológicas que se determinaron. Con ello se estimó que el subsuelo de México tiene una capacidad teórica para almacenar 100 Giga toneladas de CO<sub>2</sub>. La siguiente etapa considera el análisis de información de pozos profundos y el conocimiento de las estructuras presentes en el subsuelo para estimar la capacidad efectiva de almacenamiento. Para ello se calculan las dimensiones de las trampas geológicas que pueden almacenar el CO<sub>2</sub>, y de acuerdo al ambiente sedimentario que corresponda a la roca, se le aplica un factor de eficiencia y se multiplica por el volumen.

En México actualmente se están evaluando, a nivel de capacidad efectiva, las diversas cuencas sedimentarias que con los estudios a nivel país, se sabe que tiene potencial para almacenamiento de CO<sub>2</sub>.



Fuente: Dávila et. al. 2010

La industria que asocia el CCUS con las operaciones de recuperación mejorada de Hidrocarburos usando CO<sub>2</sub> como insumo (EOR-CO<sub>2</sub>) considera necesaria una etapa de planeación, antes de emprender la escala piloto, que se compone de las siguientes actividades:

**Análisis de Campos Potenciales.** Se revisarán los campos y yacimientos de las diversas Regiones y Activos petroleros de México y analizarán las características relativas al almacenamiento de CO<sub>2</sub>. De igual manera, se revisará información geológica selecta, obtenida durante las actividades exploratorias y de desarrollo de campos de PEMEX, y por CFE de campos geotérmicos, para identificar acuíferos salinos profundos con las características requeridas para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

**Selección y Priorización de Campos.** Se seleccionarán y priorizarán los campos que potencialmente cumplan con los criterios de viabilidad técnica establecidos para procesos de recuperación mejorada de aceite con CO<sub>2</sub>. Igualmente, se seleccionarán y priorizarán los acuíferos salinos profundos que cumplan con los requerimientos de almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

**Estrategia de EOR-CO<sub>2</sub>.** Una vez priorizados los campos-yacimientos y con base en la Política Nacional de CCUS, se definirá la estrategia de EOR-CO<sub>2</sub> de manera conjunta con la estrategia de captura de CO<sub>2</sub> en instalaciones de PEMEX y CFE. Se definirán los objetivos en el mediano y largo plazos, así como las acciones y recursos necesarios para conseguirlos.

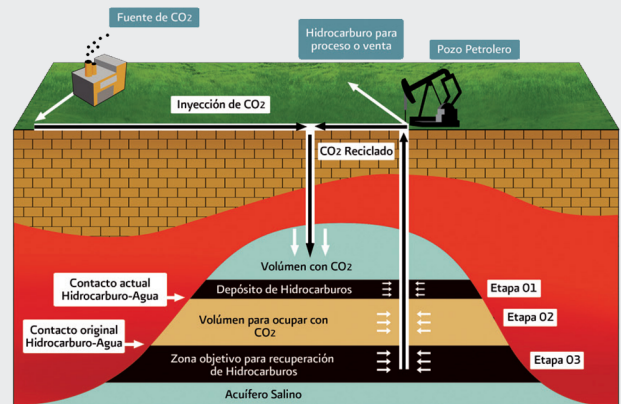
**Plan de EOR-CO<sub>2</sub>.** Derivado de la estrategia, se establecerá el plan de implementación de proyectos de EOR en los que se garantice el abasto de CO<sub>2</sub> obtenido en proyectos de captura en instalaciones de PEMEX y CFE, tanto en operaciones Piloto como Demostrativo y Comercial.

**Estrategia de Consumo y Abasto de CO<sub>2</sub>.** La integración de las Estrategias de EOR-CO<sub>2</sub> y de Captura permitirá definir la estrategia de consumo y abasto de CO<sub>2</sub>, en la que se documentarán las acciones y recursos necesarios para garantizar en el mediano y largo plazos el abasto del CO<sub>2</sub> capturado a los proyectos de recuperación mejorada conforme al plan establecido.

Esta estrategia deberá revisarse al menos cada tres años para conservar la vigencia de sus criterios de optimización.

## EOR

El EOR (Enhanced Oil Recovery, por sus siglas en inglés) o recuperación mejorada de hidrocarburos, se refiere a aquellos métodos que son usados para incrementar la recuperación de hidrocarburos por encima de las cantidades que podrían ser extraídas durante la recuperación primaria y secundaria.



Fuente: SNER / CFE. 2012.

El CO<sub>2</sub> puede ser inyectado en un reservorio de hidrocarburos para proveer presión adicional empleada para la recuperación de petróleo. Cuando el CO<sub>2</sub> es inyectado en el reservorio, se disuelve en el petróleo, por lo cual reduce su viscosidad y desplaza el petróleo hacia un pozo de producción. Sin embargo, el petróleo recuperado de esta manera, siempre va a tener una mínima cantidad de CO<sub>2</sub>, la cual es separada y posteriormente puede ser utilizada para ser inyectada nuevamente.

El EOR es la opción económica más importante en los procesos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, pues presenta la oportunidad de incrementar la producción de petróleo. Al incrementar la producción de hidrocarburos se obtiene un beneficio económico que mejora el balance costo/ingreso de la captura, transporte e inyección del proceso de CCS. El reservorio empleado para esta operación cuenta con la confianza de ser eficaz en el almacenamiento del CO<sub>2</sub>, pues a lo largo de millones de años ha acumulado hidrocarburos; además, la infraestructura de las operaciones petroleras puede ser empleada para los procesos de transporte e inyección.

#### IV.- Fases de Escalas Piloto y Demostrativa.

Una vez que las fases de Incubación, Política Pública y Planeación en materia de CCUS, han iniciado y se mantienen con programas regulares, será el momento de comenzar las actividades de proyectos piloto, seguidas de las de escalas demostrativa y comercial en ese orden. Como se verá en el orden cronológico que muestra el esquema del Mapa, no es necesario que dichas etapas finalicen para dar inicio a las siguientes, pero sí necesitan sentarse las bases que garanticen que los medios para el correcto desarrollo de éstas, se puedan llevar a cabo sin interrupción. En seguida se describirán brevemente las etapas piloto, demostrativa y comercial por separado para las industria de los hidrocarburos y de electricidad y finalmente, se describirán las actividades de las escala comercial que deberán ser atendidas por ambas industrias en forma coordinada, como por otras industrias fijas consideradas importantes desde el punto de vista de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> como la siderúrgica, la cementera y la química.

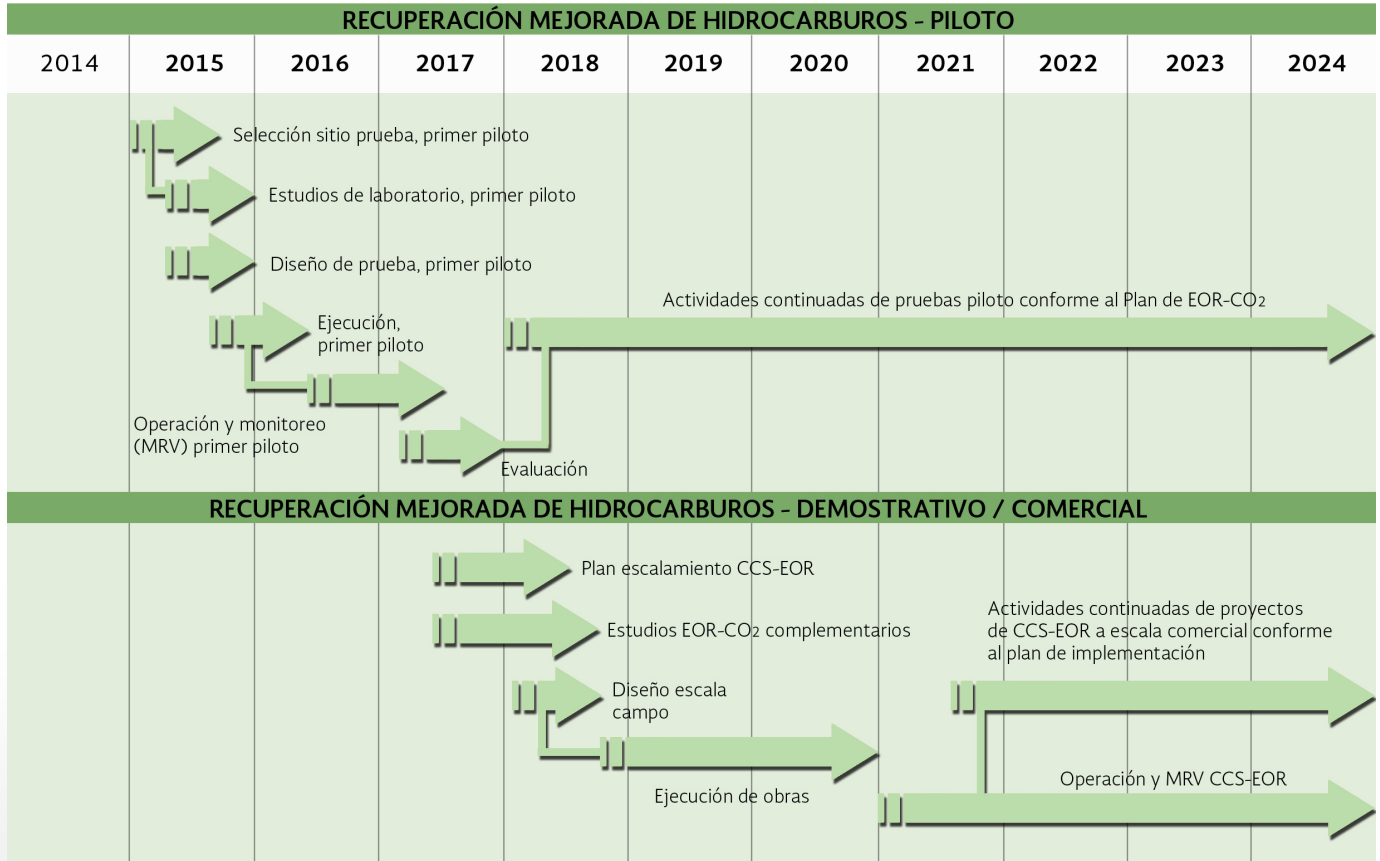
#### Iva.- Proyectos Piloto en la Industria de los Hidrocarburos

En proyectos de recuperación mejorada de aceite, esta etapa representa al grupo de acciones que se deben ejecutar para verificar, primeramente en el laboratorio

y posteriormente en un sector reducido representativo del yacimiento, la viabilidad técnica y económica de la inyección de CO<sub>2</sub> para incrementar el factor de recuperación de aceite de los campos, por encima del que se obtiene mediante procesos de recuperación primaria y secundaria. Con base en el Plan de EOR-CO<sub>2</sub> establecido, se definirán los trabajos para la ejecución de pruebas piloto de recuperación mejorada con CO<sub>2</sub>. Se hará énfasis y detallarán los trabajos a realizar en el campo-yacimiento con las mejores características y condiciones para la aplicación exitosa de un proyecto de CCS-EOR. El diseño de las pruebas piloto de EOR-CO<sub>2</sub> se trabajará de manera conjunta con el diseño de pilotos de captura, para asegurar el suministro de los volúmenes requeridos y el transporte de CO<sub>2</sub> al sitio de prueba. Cabe señalar que la etapa piloto de un proyecto de EOR-CO<sub>2</sub> tiene una duración aproximada de tres años para definir su aplicación masiva en el yacimiento, y que la aplicación de resultados a campos-yacimientos análogos permitirá reducir los tiempos en la aplicación comercial. Aunque la etapa de Pilotos podrá extenderse y desarrollarse paralelamente con la etapa Demostrativa y Comercial, el inicio de esta última se dará con la conclusión del primer proyecto piloto de CCS-EOR y el inicio de los trabajos para la aplicación del proceso a escala de campo.



MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA  
USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



Las siguientes son las fases más importantes:

**Selección de sitios de prueba.** Las actividades de la prueba piloto inician con la identificación y selección del sector del yacimiento que cumpla, con el requerimiento de representatividad de las características y condiciones que imperan en el yacimiento en estudio, de forma tal que los resultados de la prueba piloto puedan emplearse para definir la viabilidad técnica y económica de la aplicación de EOR-CO<sub>2</sub> a escala comercial. En la selección se deberá también cuidar que las condiciones mecánicas de los pozos ubicados en el sector de prueba, y su infraestructura superficial, permitan llevar a cabo las potenciales adecuaciones requeridas en la operación y monitoreo de la prueba.



## PRINCIPALES PROVINCIAS PETROLERAS EN MÉXICO

Provincia Petrolera: Es un área donde ocurren cantidades comerciales de petróleo en la que se ha identificado condiciones favorables para la acumulación de hidrocarburos.

Provincias Productoras

- 01.- Sabinas-Burros-Picachos
- 02.- Burgos
- 03.- Tampico-Misantla
- 04.- Veracruz
- 05.- Sureste
- 06.- Golfo de México Profundo
- 07.- Plataforma de Yucatán
- 08.- Cinturón Plegado de Chiapas
- 09.- Cinturón Plegado de la Sierra Madre de Oriental
- 10.- Chihuahua
- 11.- Golfo de California
- 12.- Vizcaíno- La Purísima-Iray



Fuente: PEMEX, 2013

**Estudios de laboratorio.** Esta fase comprende la realización de estudios y caracterización del comportamiento de fases de las mezclas de CO<sub>2</sub> con los fluidos del yacimiento. La presión mínima de miscibilidad del CO<sub>2</sub> en el aceite, el hinchamiento y reducción de la viscosidad del aceite, por causa de la disolución del CO<sub>2</sub>, son estudios comunes. Otras pruebas consisten en el desplazamiento de aceite con CO<sub>2</sub>, o mediante la inyección alternada de agua y CO<sub>2</sub>, para caracterizar el desempeño del proceso a escala de laboratorio, empleando muestras de roca y fluidos, a condiciones de presión y temperatura del yacimiento. Los datos que se obtienen en estas pruebas permiten construir las herramientas de modelado numérico requeridas en la fase de diseño de la prueba piloto en el sector de prueba.

**Diseño de la prueba piloto.** El diseño de una prueba piloto se sustenta típicamente en la construcción y uso de un modelo numérico que describe el proceso

de inyección de CO<sub>2</sub>, o su inyección alternada con agua, en el sector de prueba. El modelo es una representación matemática del proceso de flujo de fluidos en el yacimiento, incluyendo la interacción con los fluidos inyectados y la hidráulica del flujo en los pozos; permite estimar el efecto de la inyección de CO<sub>2</sub> sobre la recuperación adicional de aceite. En el diseño se definen las condiciones óptimas bajo las cuales se deberá conducir y dar seguimiento a la prueba piloto, de forma tal que se obtenga la información requerida en la evaluación de la viabilidad técnica y económica de la aplicación comercial del proceso. Los ritmos de inyección de CO<sub>2</sub>, y de agua alternada en su caso, son determinados; así mismo, la presión de inyección del CO<sub>2</sub> y los requerimientos de compresión. Los ritmos de producción de aceite de los pozos productores del sector, los parámetros a monitorear y la frecuencia óptima de la adquisición de datos son también definidos, así como la duración de la prueba.

**Ejecución.** Esta fase consiste en la ejecución de las obras, adecuaciones de pozos e instalaciones superficiales, y la adquisición de equipos y servicios especiales de apoyo requeridos en la operación y seguimiento de la prueba piloto.

**Operación, seguimiento y evaluación.** Esta fase consiste en la implementación del programa de inyección-producción de fluidos en los pozos del sector piloto, conforme a diseño, y del monitoreo de datos de presión, inyección-producción y composición de los fluidos producidos durante la prueba. La irrupción del CO<sub>2</sub> en los pozos productores y la evolución de su concentración en la corriente de gas producido son datos de capital importancia que deberán recabarse.

La evaluación de los beneficios de la prueba piloto deberá basarse en criterios preestablecidos. El ajuste del modelo numérico del sector de prueba piloto con los datos obtenidos durante la prueba, permitirá estimar los beneficios de la inyección de CO<sub>2</sub> en el mediano y largo plazos, en términos de recuperación adicional de aceite, así como estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> que permanecerá atrapado en el yacimiento; de igual forma, la predicción de los cambios de la concentración de CO<sub>2</sub> en la corriente de gas producido, permitirá definir el programa de manejo de CO<sub>2</sub> en superficie, en lo correspondiente a su separación del gas hidrocarburo y reciclado en el yacimiento, información requerida en todo programa de CCS-EOR.

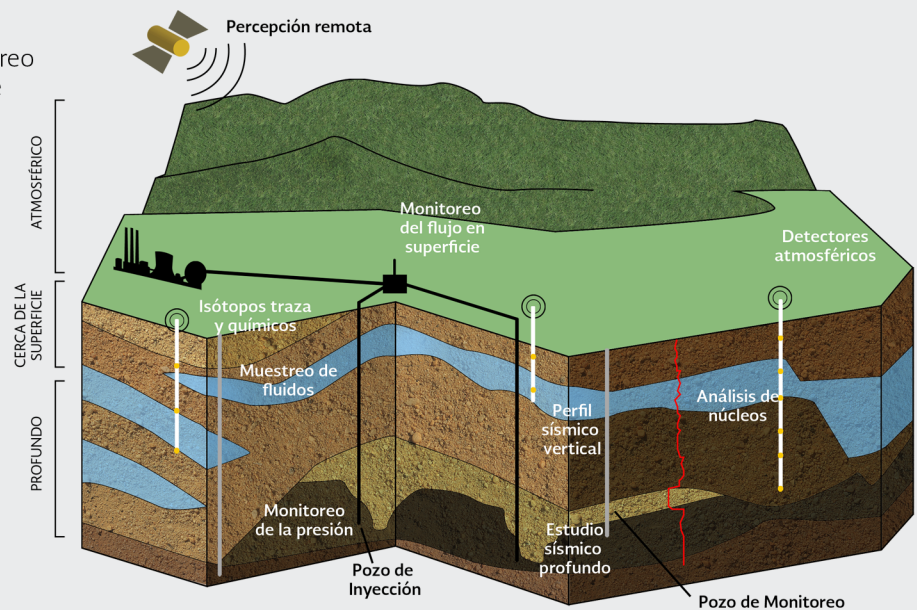
## EL POR QUÉ DEL MONITOREO DE RESERVORIOS

Dentro de las etapas que integran la tecnología del CCUS, el monitoreo es una de las más importantes pues en ella recae la confianza de la sociedad en la seguridad del almacenamiento geológico. Cuando un sitio es seleccionado para llevar a cabo la inyección de CO<sub>2</sub> debe garantizarse al máximo posible la imposibilidad de riesgo de fuga.

Las técnicas de monitoreo son realizadas antes, durante y después de la inyección para tener los parámetros base, observar la operación durante la inyección y garantizar la permanencia del gas en el subsuelo de por vida. Cada proyecto deberá desarrollar un diseño de monitoreo específico que abarque las áreas del subsuelo profundas, someras y el análisis atmosférico

En las formaciones profundas el monitoreo está enfocado en el horizonte de inyección. En las áreas más someras lejanas al punto de inyección: es primordial llevar a cabo sondeos sísmicos 3 y 4D con la finalidad de conocer la evolución del movimiento de carbono, y también se realizan muestreos químicos de acuíferos someros para identificar si el agua potable ha sido contaminada. Entre otras herramientas, el monitoreo superficial que se verifica, consta del análisis de la composición del aire y la deformación de la superficie.

Hasta ahora no se ha especificado el periodo de tiempo durante el que se deberá monitorear este tipo de proyectos aún después del cierre.



Fuente: <http://www.slb.com/services/additional/carbon/monitoring.aspx>

## MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

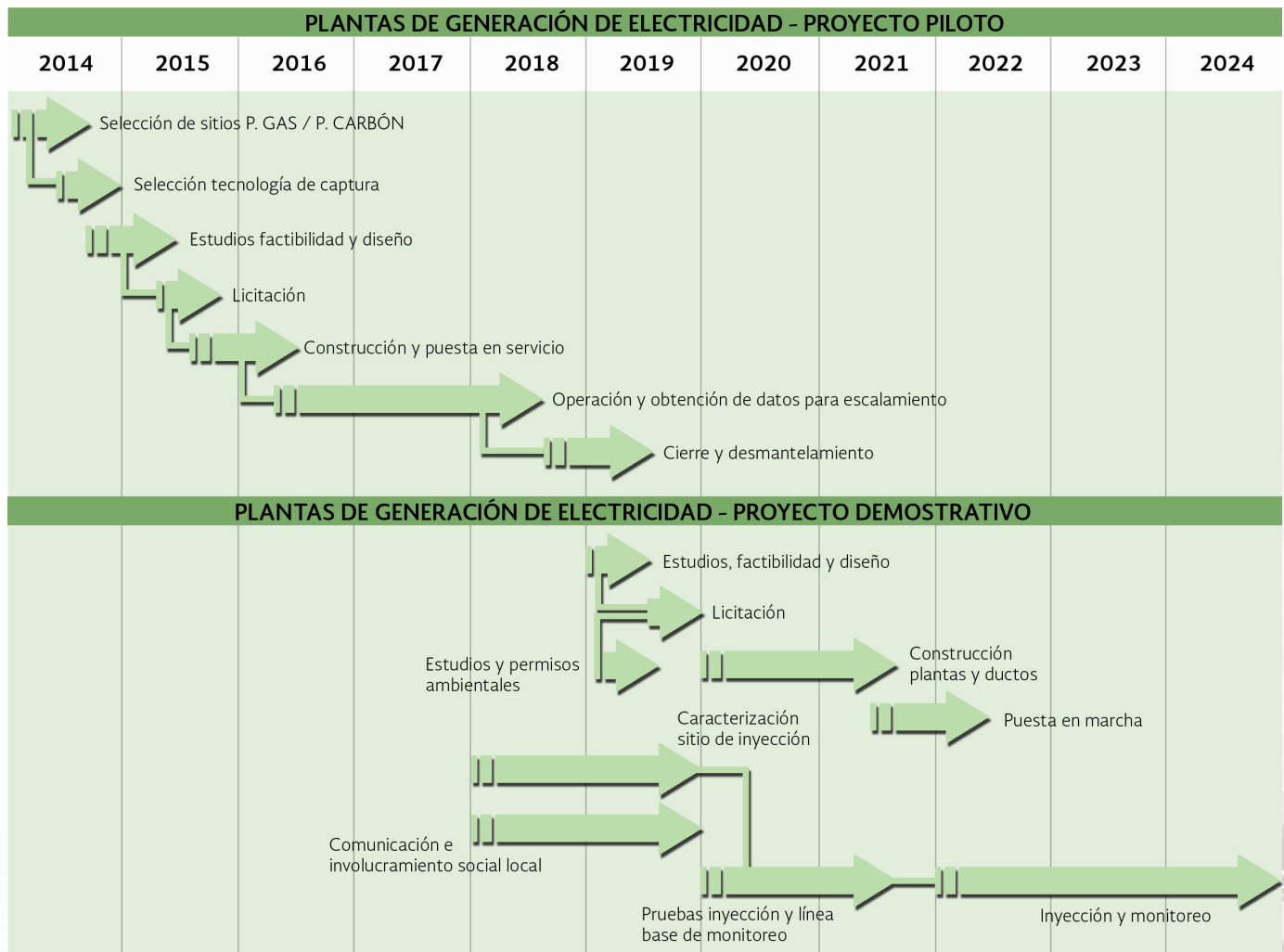
### IVb.- Proyecto Piloto en la Generación de Electricidad.

El proyecto piloto para Plantas de Generación de Electricidad considera la captura de CO<sub>2</sub> en una Planta Generadora para conocer la viabilidad técnica y económica. Además de conocer los parámetros críticos para escalarla al nivel demostrativo. Por las condiciones actuales de la infraestructura eléctrica, la planta de

captura se considera con tecnología postcombustión con aminas de un flujo equivalente a una central de 2 MW con lo que se produciría un caudal aproximado máximo de 10 tCO<sub>2</sub>/día.

Las siguientes son las fases más importantes:

### MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



### **Selección de sitios de planta a base de Gas o Carbón.**

Las actividades de la prueba piloto inician con la identificación de las centrales que cumplan con las características necesarias para adaptar una planta de separación y captura de CO<sub>2</sub>. Para posteriormente seleccionar en cuál de ellas se llevará a cabo la prueba de captura de CO<sub>2</sub> buscando coincidencias a futuro para proyectos colaborativos CFE-PEMEX.

**Selección de tecnología de captura.** En esta fase se deberán considerar las diferentes tecnologías de captura que se emplean en el mundo y seleccionar la que mejor se adapte a las plantas generadoras de electricidad existentes en México. Por otra parte, se pretende contar con un análisis de costo beneficio que a futuro permita decidir cuál es la tecnología más conveniente desde la etapa de diseño de una nueva central.

**Estudios de factibilidad y diseño.** Estos estudios deben aportar la información técnica y económica que permita elaborar las especificaciones técnicas y costo base de la construcción y puesta en servicio de la planta piloto que deberán incluirse en su licitación.

**Licitación.** El proyecto de construcción de la planta piloto se licitará para su construcción.

**Construcción y puesta en servicio.** Esta fase consiste en la construcción de la planta piloto conforme a diseño, y en la aplicación de pruebas que permitan demostrar que la planta funciona de acuerdo al mismo.

**Operación y obtención de datos para escalamiento.** Una vez construida la planta piloto, se procederá a su operación por personal de CFE y con base al monitoreo del proceso de captura de CO<sub>2</sub> se harán evaluaciones periódicas de desempeño que permitan determinar la eficiencia de captura, penalización energética y costos a nivel piloto y en general, los parámetros que se deben considerar para un escalamiento futuro.

**Cierre y Desmantelamiento.** Al concluir con la etapa de pruebas piloto se procederá al cierre y desmantelamiento de la unidad de separación y captura de CO<sub>2</sub>.

### **IVc.- Proyecto Demostrativo.**

Para el proyecto demostrativo que se debería desarrollar una vez superada la etapa del piloto (posiblemente con el caudal equivalente al flujo de CO<sub>2</sub> que produciría una planta de 20 MW), se requiere el desarrollo de varias etapas previas como: selección de campos y tecnologías, desarrollo de pruebas de laboratorio, y diseño y ejecución de pruebas piloto, independientemente de la construcción o escalamiento de la planta de captura.



## PROYECTOS DE CCUS EN EL MUNDO

Los proyectos de CCUS se definen de acuerdo con su escala de desarrollo en:

PILOTO (< 20 kt de CO<sub>2</sub>/año) .- el objetivo es aplicar la tecnología de CCUS a pequeña escala para medir datos y obtener información que guíe el proyecto a futuras acciones.

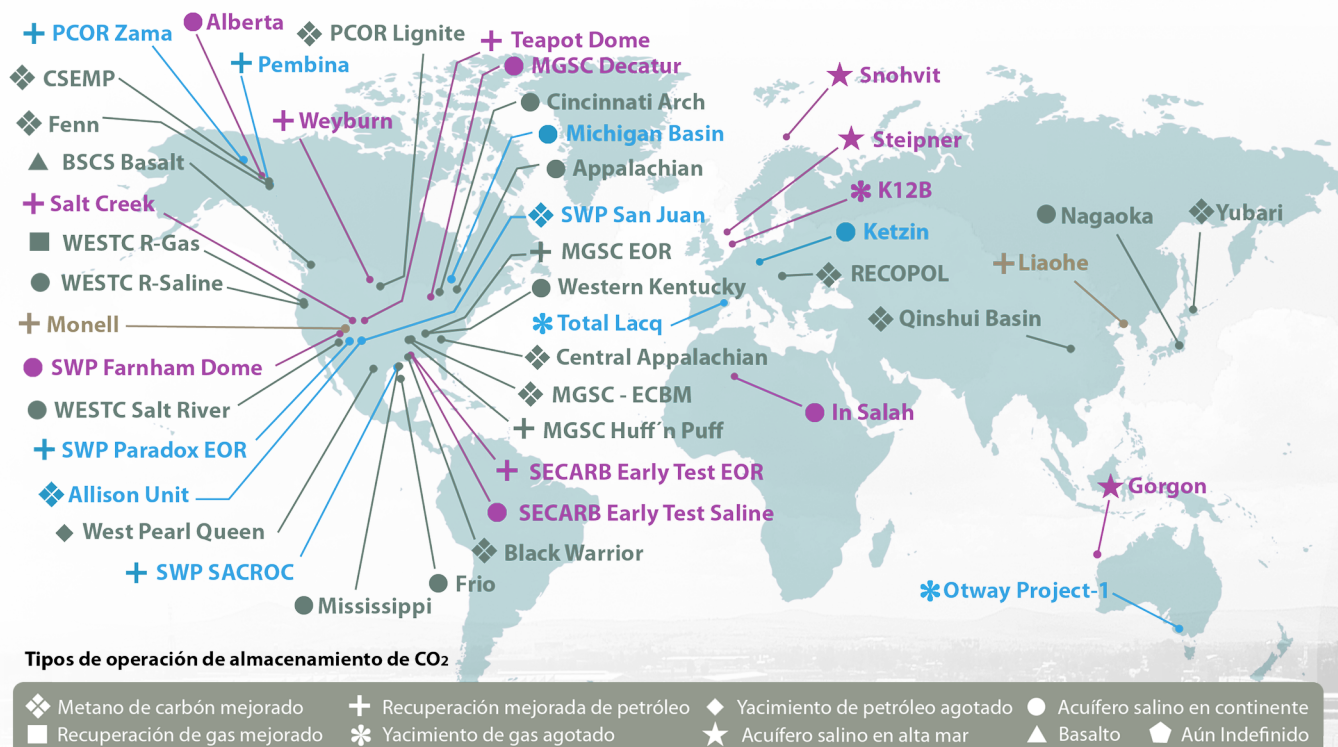
DEMOSTRATIVO (< 500 kt de CO<sub>2</sub>/año) .- es una etapa a mediana escala que pretende comprobar la efectividad, seguridad y alcance de esta tecnología.

COMERCIAL (> 500 kt de CO<sub>2</sub>/año) .- esta escala de proyecto se realiza una vez que ha sido probada la tecnología y se considera que su desarrollo generará beneficios económicos y/o sociales.

También pueden clasificarse a partir del tipo de operación de almacenamiento en:

- Recuperación mejorada de petróleo
- Campos agotados de petróleo o gas
- Acuíferos salinos profundos
- Otros

Este tipo de proyectos se realizan en todo el mundo, principalmente en Norteamérica y Europa, sin embargo cada vez más países se suman al compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generado por la industria.



Fuente: <http://www.globalccsinstitute.com/publications/global-status-ccs-2011>

Las siguientes son sus fases más importantes:

**Caracterización del sitio de inyección.** Consiste en el modelado a detalle del sitio de inyección para conocer las características del sector del reservorio salino que cumpla con las características y condiciones de una trampa geológica, sus condiciones de inyectividad y garantía de la roca sello que permitan demostrar que es un sitio adecuado previo a la inyección. En la selección se deberá también cuidar que las condiciones mecánicas de los pozos ubicados en el sector de prueba, y su infraestructura superficial, permitan llevar a cabo las potenciales adecuaciones requeridas en la operación y monitoreo de la prueba. Este es un paso independiente a la decisión del posible uso del CO<sub>2</sub> para fines de EOR, en cuyo caso la inyección se llevaría a cabo en un campo previamente seleccionado en la fase de piloto o demostrativa de la opción EOR descrita con anterioridad. Sin embargo, un sitio ASP es necesario para garantizar que el CO<sub>2</sub> producido tendrá un sitio de inyección, aun en el caso de que temporal o definitivamente el envío de CO<sub>2</sub> a un campo de EOR sea factible.

**Estudio de factibilidad y diseño.** Consiste en el análisis de los resultados de la Planta Piloto y su escalamiento con estudios de laboratorio, y en lo general de la adquisición de datos adicionales, para reducir la incertidumbre de la aplicación a una escala mayor. Como producto deberán obtenerse las especificaciones técnicas y económicas que se integrarán a las bases de licitación del proyecto demostrativo.

**Licitación.** El proyecto de construcción de la planta demostrativa se licitará para su construcción.

**Estudios y permisos ambientales.** Una vez que se ha llevado a cabo el diseño del escalamiento de la Planta de Captura, se deberán realizar los estudios ambientales y permisos necesarios ante las autoridades correspondientes para su construcción.

**Comunicación e involucramiento social local.** Todo proyecto de nueva creación debe comunicarse a la población involucrada, por lo cual es necesario establecer un área de divulgación y comunicación para las comunidades que se localicen en el entorno de la Planta de una manera profesional.

**Escalamiento (Construcción) de planta y ductos.** Se deberá obtener una licencia de construcción para la planta y los ductos. Primero se deberá contar con la autorización por parte de la autoridad ambiental y los permisos de uso de suelo y derecho de vía para los ductos, y sólo entonces proceder a su construcción (escalamiento)

**Pruebas de inyección y línea base de monitoreo.** Se deberá tener un conocimiento cabal del subsuelo que permita modelar el comportamiento de la pluma de CO<sub>2</sub> durante la inyección. Para lo cual se deberán perforar o implementar cuando menos dos pozos que sirvan de monitoreo y un cubo sísmico de toda el área de influencia que se haya determinado en la etapa previa.

**Puesta en marcha.** Una vez liberados los permisos se obtendrá una licencia de operación de la planta de captura para iniciar la etapa demostrativa- comercial que incluye todo el proceso de Captura, Transporte e Inyección.

**Inyección y monitoreo.** Una vez que se inicie la inyección se deberá llevar a cabo un monitoreo, diseñado previamente y adaptado mediante los resultados que se vayan obteniendo en la operación.



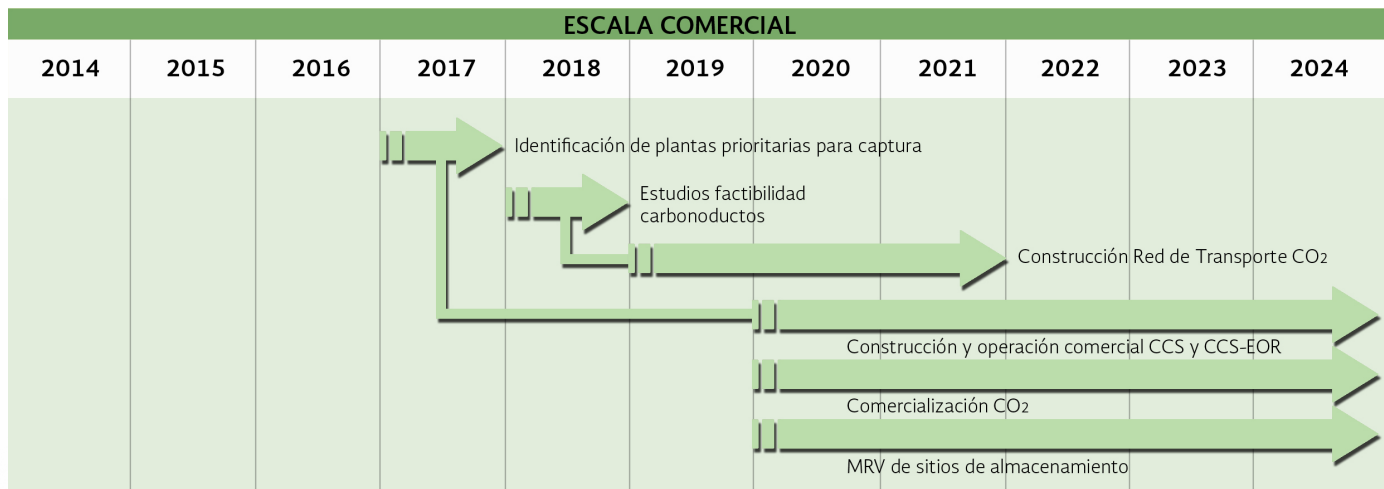
## MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE CCUS EN MÉXICO

### V.- Escala Comercial.

Para cuando se hayan superado las etapas piloto y demostrativa, se considera que será posible explotar la tecnología CCUS a escala comercial, es decir, se podrá expandir su uso a toda la industria fija emisora de CO<sub>2</sub> (deseablemente) y para entonces, los costos de su implementación y los incentivos para su incorporación deberían estar resueltos. Debe notarse que la última parte de las fases demostrativas tanto de la industria de

los hidrocarburos como de generación de electricidad se traslapan con la fase comercial; sin embargo, hay que aclarar que en ese sentido lo que significa es que se ha dominado la tecnología de captura y almacenamiento en volúmenes importantes de emisiones. Mientras que en esta parte del proceso, que ahora se describe, el término comercial se refiere a la masificación del uso de la tecnología. El cual se compone de los siguientes pasos:

**MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA**  
USO, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>



### PROYECTOS INTEGRADOS A GRAN ESCALA (LARGE SCALE INTEGRATED PROJECTS - LSIP)

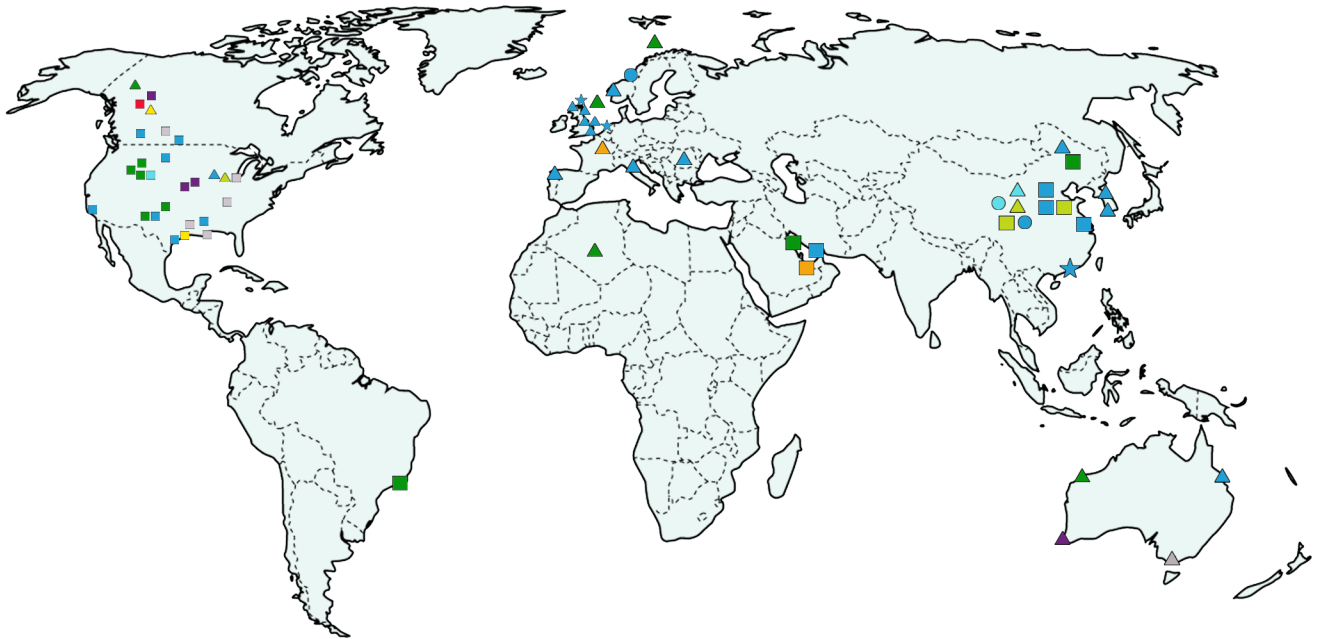
Hasta el 2013 se tienen reconocidos 65 proyectos a gran escala de los cuales 20 se encuentran en operación, construcción o ejecución, con una capacidad de almacenamiento superior a 33 millones de toneladas al año.

Los proyectos que más han aportado conocimiento y demostrado las tecnologías para la captura, transporte y almacenamiento permanente de CO<sub>2</sub> antropogénico, así como el monitoreo y verificación hasta ahora se relacionan a continuación:

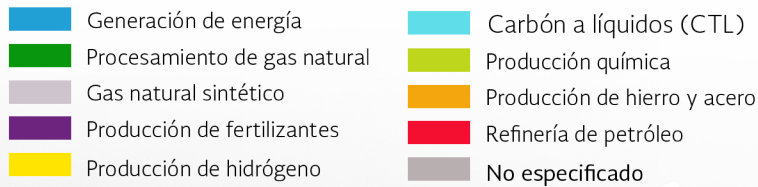
- Sleipner (Noruega) en acuífero salino profundo
- Weyburn-Midale (Canadá) para recuperación mejorada con monitoreo y verificación
- In Salah (Argelia) en acuífero salino profundo
- Snohvit (Noruega) en acuífero salino profundo

La escala de almacenamiento se define de acuerdo con los volúmenes mínimos más comunes emitidos por las plantas de generación eléctrica u otras industrias. Estos se han establecido como: Al menos 800 000 ton de CO<sub>2</sub> anuales para plantas de generación de electricidad y, al menos 400 000 ton de CO<sub>2</sub> al año para emisiones provenientes de otras industrias, utilizando la tecnología de CCUS.

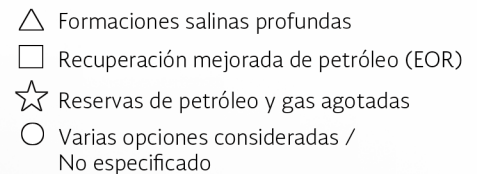
MAPA DE RUTA  
TECNOLÓGICA DE  
CCUS EN MÉXICO



Proyectos integrados de gran escala  
Por tipo de Industria



Tipo de almacenamiento



Fuente: Global CCS Institute, 2013

### CCS-EOR

Una vez demostrados los beneficios de EOR-CO<sub>2</sub> mediante pruebas piloto, o aplicaciones análogas, y con base en el Plan de EOR-CO<sub>2</sub>, se definirán los trabajos a realizar en la implementación de proyectos de recuperación mejorada con CO<sub>2</sub> a escala comercial. Los trabajos de esta etapa iniciarán con la masificación del primer proyecto piloto exitoso de CCS-EOR. Las actividades a realizar consistirán de estudios complementarios de laboratorio para reducir la incertidumbre de la aplicación, dadas las heterogeneidades que pudieran estar presentes en el yacimiento, así como otros estudios de yacimientos, pozos e instalaciones de producción, requeridos en el diseño e implementación de la aplicación a escala comercial. El diseño de la aplicación a escala comercial de EOR-CO<sub>2</sub> se trabajará de manera conjunta con el proyecto de captura de CO<sub>2</sub> para asegurar los

volúmenes de CO<sub>2</sub> requeridos, así como su transporte al yacimiento. Se ejecutará, operará, dará seguimiento y evaluarán los resultados de la aplicación a escala de campo y harán los ajustes convenientes para la optimización del proyecto

Durante esta etapa se tendrá como entregables el diseño, ejecución y evaluación del primer proyecto comercial de CCS-EOR de México, así como estudios y el inicio de pilotos de otros campos-yacimientos, conforme al Plan de EOR-CO<sub>2</sub>.

Las siguientes son sus fases más importantes:

**Plan de escalamiento.** Consiste del plan de acciones que deberán implantarse para extender la aplicación de CCS-EOR a escala de campo, toda vez que su viabilidad técnica, ambiental, social y económica fue verificada con los resultados de la prueba piloto; los datos e

información obtenida durante la prueba servirán de insumo para sustentar el plan de escalamiento. Las tareas de la aplicación a escala comercial deberán definirse y programarse en el tiempo, así como los requerimientos de infraestructura y capital.

**Estudios complementarios.** Consiste de estudios de laboratorio, y en lo general en la adquisición de datos adicionales, para reducir la incertidumbre de la aplicación a escala de campo-yacimiento. Estudios de laboratorio del tipo citado previamente, en la documentación de la etapa Piloto, podrán ser necesarios; pruebas de inyectividad de CO<sub>2</sub> en pozos tipo seleccionados como inyectores, la adquisición de registros geofísicos en algunos de los pozos para determinar la saturación de aceite antes de la implementación del proceso, podrán requerirse y deberán programarse. La actualización del modelo numérico con la última información obtenida de la operación del campo-yacimiento y su adecuación para modelar los efectos composicionales de la inyección de CO<sub>2</sub> al yacimiento, a partir de la calibración del modelo sectorial con los resultados del piloto, son tareas que deberán realizarse para disponer de las herramientas requeridas en el diseño de la aplicación a escala comercial.

**Diseño de la aplicación a escala de campo.** Consiste en diseñar las condiciones óptimas, técnicas y económicas, de la aplicación de EOR-CO<sub>2</sub> a escala de campo. El diseño se basa en el uso del modelo numérico del campo-yacimiento-pozos, actualizado y adaptado con los datos y resultados del piloto para describir el proceso de inyección de CO<sub>2</sub> y variaciones convenientes, como la inyección alternada de CO<sub>2</sub> y agua. El número de pozos inyectores y productores, y



su ubicación en el yacimiento son determinados, así como los ritmos de inyección de CO<sub>2</sub>, y agua en su caso, y producción de aceite de los pozos. Se define también la presión de inyección y los requerimientos de compresión para el suministro de CO<sub>2</sub> a los pozos inyectores. Se establecen, a la vez, los parámetros a monitorear y la frecuencia óptima de la adquisición de datos. De capital importancia es la estimación que arroja el modelo del tiempo de irrupción de CO<sub>2</sub> en los pozos productores y de la evolución de su concentración en la corriente de producción de gas a lo largo del tiempo; con ello será posible establecer la estrategia de manejo del CO<sub>2</sub> producido, esto es los requerimientos para su separación del gas hidrocarburo y un programa de reciclado y reutilización. Los estimados del volumen de gas que permanecerá almacenado en el yacimiento podrán igualmente obtenerse.

**Ejecución.** Esta fase consiste en la ejecución de las obras, adecuaciones de pozos e instalaciones superficiales, y la adquisición de equipos y servicios especiales de apoyo requeridos en la operación y seguimiento de la implementación de CCS-EOR a escala comercial.

**Operación de proyectos CCS-EOR.** Consiste en la implementación del programa de captura de CO<sub>2</sub>, inyección-producción de fluidos en los pozos, conforme a diseño, y del monitoreo de datos de presión, inyección-producción y composición de los fluidos producidos durante la prueba. De capital importancia es el registro de los tiempos de irrupción del CO<sub>2</sub> en los pozos productores y la evolución de su concentración es la corriente de gas producido. La verificación del comportamiento previsto con los resultados obtenidos durante la aplicación es una tarea fundamental; la causa de potenciales desviaciones deberá detectarse oportunamente para aplicar, en su caso, las medidas correctivas que permitirán mantener la operación del proceso en condiciones óptimas. El monitoreo del CO<sub>2</sub> en sitios convenientes, pozos e instalaciones, y la verificación de que su almacenamiento en el yacimiento está cumpliendo con los estándares establecidos, es una tarea primordial para el proyecto de CCS-EOR.

Otras Actividades de la Escala Comercial son:

**Identificación de Plantas Prioritarias para Captura.** Debe ser una estrategia nacional tener identificadas todos aquellos puntos emisores, que ya sea por el volumen de CO<sub>2</sub> que generan, como por la cercanía a un punto de inyección, o por la rentabilidad del uso del

bióxido de carbono en un proceso productivo. Estas industrias deberían ser los primeros en incorporarse a un esquema masivo de CCUS. Subsecuentemente deberían irse incorporando a un sistema nacional de captura, aquellas que cumplen estas condiciones en una menor medida y así sucesivamente.

**Estudio de Factibilidad de Carbonoductos.** Como ya se comentó en la etapa de Política Pública, el volumen de CO<sub>2</sub> de una sola planta industrial emisora no es atractiva para usarlo rentablemente. Es necesaria una red de carbonoductos que haga viable económicamente el traslado de un punto de emisión a uno de secuestro. En esta etapa del proceso se deberá llevar a cabo un análisis técnico económico que permita desarrollar dicha red de ductos de carbono que hagan su construcción lo más eficiente y rentable posible.

**Construcción de Red de Transporte CO<sub>2</sub>.** La construcción de la red analizada y diseñada en el paso anterior deberá dar lugar a la construcción de los ductos que hagan posible el transporte del bióxido de carbono oportunamente para cuando la captura en todo tipo de industria emisora se masifique.

**Construcción y Operación Comercial CCUS y CCS-EOR.** La industria madura del almacenamiento de CO<sub>2</sub> en medios geológicos seguramente será una realidad conforme se vaya acercando el año 2050. Lo contrario significará que, o bien la Humanidad encontró cómo sustituir los combustibles fósiles como base de su desarrollo, o que las metas de disminución de gases de efecto invernadero no se han cumplido, lo cual sería grave. Pero si la industria de CCUS, efectivamente alcanza su madurez, hará falta que cada país tenga un esquema de asociación de puntos de emisión con sitios de captura. Ya sea asociándolo a recuperación mejorada de hidrocarburos (CCS-EOR) o sencillamente a sitios de captura geológica sin rentabilidad económica adicional (CCS). Este ejercicio será necesario hacerse en México para la fase final del proceso de este MRT, y deseablemente será la etapa última e indefinida en que existan en el país un número importante de plantas industriales que capturan sus emisiones ricas en CO<sub>2</sub>, y las transportan y almacenan a través de una red de ductos a sitios en los que reciben un incentivo económico a cambio, o sólo se almacenan con la finalidad de evitar impuestos por emisiones de carbono.

## CARBONODUCTOS

El CO<sub>2</sub> capturado debe ser transportado desde el punto de captación hasta un lugar de almacenamiento.

En la actualidad, los gasoductos funcionan como una tecnología de mercados maduros y son el método más común de transporte de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> es comprimido a una presión superior a 8 MPa para facilitar y abaratar su transporte. También puede ser transportado en forma líquida en buques.

El primer gasoducto de CO<sub>2</sub> de larga distancia entró en funcionamiento en los primeros años del decenio de 1970. En los Estados Unidos, más de 2,500 km de gasoductos transportan más de 40 Mt de CO<sub>2</sub> al año desde fuentes naturales y antropogénicas hasta los lugares de almacenamiento, principalmente, en Texas, donde el CO<sub>2</sub> es utilizado para la recuperación mejorada de petróleo.

En la mayor parte de esos gasoductos, el flujo es impulsado por compresores en el extremo inicial, si bien algunos gasoductos tienen estaciones de compresión intermedias (impulsoras).

Muchos de los países donde se implementa la tecnología de CCUS, han decidido instalar una red de ductos para transportar el CO<sub>2</sub> desde las fuentes emisoras fijas hasta los sitios adecuados para el uso y almacenamiento, con tal de manejar volúmenes de una magnitud que haga rentable el proceso, como por ejemplo el asociado a la recuperación mejorada de hidrocarburos.



Foto: BP p.l.c.

En cualquier caso, es la etapa en la que la tecnología de la captura y almacenamiento del geológico se constituirá – deseablemente – como la opción que permita seguir utilizando combustibles fósiles sin que eso implique aumentar la proporción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, al menos parcialmente.

**Comercialización de CO<sub>2</sub>.** Es de esperarse que conforme transcurra el tiempo, el CO<sub>2</sub> eleve su precio comercial. Este aspecto es la razón para pensar que en la fase final del proceso del MRT sea el relativo a participar en un mercado nacional e internacional de emisiones (CO<sub>2</sub>).

**Monitoreo, Reporte y Verificación.** Una vez que la tecnología CCUS sea dominada y su implementación sea una industria madura en el país, será necesario el apego a una normatividad, desarrollada previamente, para garantizar que el CO<sub>2</sub> secuestrado en medios geológicos permanecerá debajo de la superficie por siempre. Para asegurarlo, deberán llevarse a cabo procedimientos oficiales de monitoreo certificados por estándares internacionales, verificarlos de forma veraz y estar emitiendo reportes que permitan que la sociedad pueda conocer que el grado de evolución de cada reservorio es aceptable o en su caso plantear las medidas necesarias para la corrección de la operación de los depósitos.







## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blasing, T. J. and Boden, T., 2013. Recent Greenhouse Gas Concentrations, Oak Ridge National Laboratory - Environmental Sciences Division.

Daniel, R.F. and Kaldi, J.G., 2008. Evaluating seal capacity of caprocks and intraformational barriers for the geosequestration of CO<sub>2</sub>, Eastern Australasian Basins Symposium, Sydney, NSW.

INE, 2006. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Moisés Dávila, Oscar Jiménez, Reyna Castro, Vicente Arévalo, Jessica Stanley and Laura Meraz Cabrera. 2010. A preliminary Selections of Regions in Mexico with potential for geological carbon storage; Journal of physical sciences vol. 5, pp. 408-414, May 2010.

Mota-Nieto 2013. Evaluación de la Capacidad de Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub> en la Región de San Fernando, Tamaulipas. UNAM, México.

Peck, W.D., Buckley, T.D., Battle E.P., and Grove, M.M., compilers and creators, 2012, Plains CO<sub>2</sub> Reduction (PCOR) Partnership atlas (4th ed.): Prepared for the U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory and the PCOR Partnership, Grand Forks, North Dakota, Energy & Environmental Research Center, 124 p.

PEMEX, Exploración y Producción, 2013, "Las reservas de hidrocarburos de México, al 1 de enero de 2013".

SEMARNAT, 2012. Ley General de Cambio Climático, México.

SENER / CFE, 2012. Atlas de Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub>, México, Pag. 15.

The Global Status of CCS 2013, Global CCS Institute, P. 26.

<http://www.slb.com/services/additional/carbon/monitoring.aspx> ©Schlumberger 2014.

<http://www.globalccsinstitute.com/publications/global-status-ccs-2011> © Global CCS Institute 2011.

Todas las fotografías son propiedad de Secretaría de Energía a excepción de la foto en la página 27, que es propiedad de "BP p.l.c."

