



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO: UNA
INVESTIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

CRESCENCIO GONZALEZ MOISES



DIRECTOR DE TESIS:
M. en C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de terminar mis estudios y con orgullo la llevare donde vaya.

Doy gracias a la M. en C. Ana Lilia Maldonado Arellano por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible, de corazón estoy muy agradecido con usted.

Doy gracias al M. en M. Genaro Altamirano García por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible, de corazón estoy muy agradecido con usted.

Doy gracias al I. Q. Francisco Javier Mandujano por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible, de corazón estoy muy agradecido con usted.

Doy gracias al I. Q. Miguel José Flores Galaz por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible, de corazón estoy muy agradecido con usted.

Doy gracias al I. Q. Consuelo Matías Garduño por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo ya que sin ella no hubiese sido posible, de corazón estoy muy agradecido con usted.

Doy gracias al arquitecto Hugo Roberto Saavedra Martínez, por toda esa ayuda proporcionada en el transcurso de este trabajo, es un honor para mí haberlo conocido y a su vez trabajar con él, gracias.

Doy gracias a mi querida esposa la Licenciada Araceli Hernández Matías por toda esa ayuda que me ha brindado siempre, a mis hijos Aldair y Guadalupe que son el motor que me impulsan todos los días, a todos mis amigos gracias.

ÍNDICE

OBJETIVOS	6
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I.- ANTECEDENTES DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)	9
1.- HISTORIA DEL DIÓXIDO DE CARBONO	10
1.1.- EL CALENTAMIENTO ACTUAL	11
1.2.- FOCOS EMISORES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)	14
1.3.- INDUSTRIAS	14
1.4.- INDUSTRIA ELÉCTRICA	17
1.5.- EL CONTROL DE LA CONTAMINACION Y DEL CALENTAMIENTO GLOBAL VAN DE LA MANO	18
1.6.- EMISIONES ACTUALES A LA ATMÓSFERA DE (CO₂) DERIVADAS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	18
1.7.- EL FUTURO ENERGÉTICO	21
1.8.- AUTOMOTRIZ	22
1.9.- PROTOCOLO DE KIOTO	23
1.9.1.- ORÍGEN DEL PROTOCOLO DE KIOTO	23
1.9.2.- CONTENIDO DEL PROTOCOLO DE KIOTO	25
1.9.3.- GASES CONTEMPLADOS	25
1.9.4.- OBJETIVOS DEL PROTOCOLO DE KIOTO	26
1.9.5.- PAÍSES FIRMANTES	26
1.9.6.- QUE SUCEDE DESPUES DEL PROTOCOLO DE KIOTO	27
CAPÍTULO II.- CAPTURA Y CONFINAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO	29

2.- SUMIDEROS DE CARBONO, UNA CAPTURA INDIRECTA.....	30
a) LOS BOSQUES	30
b) LOS OCEÁNOS.....	30
c) CAUSAS QUE PROVOCAN EL AUMENTO DE TEMPERATURA	31
d) GASES DE EFCETO INVERNADERO	32
2.1.- IMPORTANCIA Y APORTACIÓN DE LAS ASOCIACIONES Y CONVENCIONES AMBIENTALES.	32
2.2.- CONVENCIÓN MARCO DE NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO (CMNUCC).....	32
2.3.- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM).	35
2.4.- SURGIMIENTO DE MECANISMOS DE DESARROLLO LÍMPIO (MDL).35	
2.4.1.- EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL) Y LOS MECANISMOS COOPERATIVOS.....	36
2.5.- PANORAMA GLOBAL DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) Y SUS APLICACIONES.....	36
2.5.1.- AGRICULTURA.....	37
2.5.2.- USOS INDUSTRIALES.....	37
2.5.3.- QUÍMICOS.....	37
2.5.4.- FARMACÉUTICA.....	37
2.5.5.- ALIMENTOS Y BEBIDAS.....	37
2.5.6.- MEDICINAL.....	38
2.5.7.- INDUSTRIA DE LOS METALES.....	38
2.5.8.- LABORATORIOS Y ANÁLISIS.....	38
2.5.9.- PULPA Y PAPEL.....	38
2.5.10.- ELECTRÓNICA.....	38
2.5.11.- AMBIENTAL.....	39
2.5.12.- INDUSTRIA PETROLERA.....	40
2.6.- CIRCUNSTANCIAS GEOLÓGICAS E INCERTIDUMBRES ASOCIADAS AL ALMACENAMIENTO DE (CO₂) EN YACIMIENTOS DE GAS Y PETRÓLEO.....	44

2.6.1.- PROYECTO EOR Y EGR EN CURSO	44
2.6.2.- EL PROYECTO IN-SALAH.....	46
2.6.3.- EL PROYECTO WEYBURN.....	48
2.6.4.- EL PROYECTO SACS-PLATAFORMA SLEIPNER (MANR DEL NORTE).	50
2.7.- TRANSFORMACION BIOMIMÉTICA DEL (CO ₂) BIOCOMBUSTIBLES DE CUARTA GENERACIÓN.....	51
2.8.- DISMINUIR LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) CON BIOTECNOLOGÍA.	52
CAPÍTULO III.- TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).	55
3.- TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	56
3.1.- LAS FUENTES DE EMISIÓN POSIBLES A SER CAPTURADAS.....	58
3.2.- OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA CAPTURA DE (CO ₂)	59
3.2.1.- CAPTURA DIRECTA DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	59
3.2.2.- PRECOMBUSTIÓN	59
3.2.3.- POSTCOMBUSTIÓN.....	60
3.2.4.- OXICOMBUSTIÓN.....	61
3.3.- CONFINAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	61
3.3.1.- ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS QUE CONTUVIERON PETRÓLEO	61
3.3.2.- ACUÍFEROS SALINOS	62
3.3.3.- CONFINAMIENTO OCEÁNICO	62
3.3.4.- CAVIDADES CREADAS POR DISOLUCIÓN EN SAL	63
3.4.- IMPACTOS, RIESGOS ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES.....	64
3.5.- PERCEPCIÓN PÚBLICA	65
CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.	68

OBJETIVOS.

1. Realizar un análisis de emisión de Dióxido de Carbono resaltando la importancia de mantenerlo en equilibrio con la naturaleza, los seres humanos y la industria.
2. Comparar las tecnologías utilizadas así como la viabilidad para ser usada en la industria.
3. Dar a conocer las posibles alternativas en el confinamiento del dióxido de carbono, sus ventajas y desventajas.

RESUMEN.

Este trabajo de investigación teórica se enfoca en el análisis de los gases de efecto invernadero (GEI), en particular el Dióxido de carbono, repercusiones, problemas ambientales y las emisiones así como las posibles alternativas para solucionar la situación a raíz del CO₂. Sin olvidar que dentro de la misma se contemplan las aplicaciones posibles para el bienestar humano. Con un análisis de tecnología de captura de dióxido de carbono. Entre las que destacan:

- a) Precombustión.
- b) Postcombustión.
- c) Oxidación.

De las cuales se estudia por separado, presentando las posibles ventajas y desventajas de cada una. Teniendo en cuenta el bienestar del medio ambiente-sociedad; se concluye con una tecnología aplicable, con las mejores características para ser implementada en el ramo industrial, que a su vez ayudará a mitigar los problemas ecológicos de nuestro presente.

INTRODUCCIÓN.

A principios de siglo, desde que la sociedad humana ha pisado los umbrales terrestres se ha enfrentado a una serie de circunstancias; circunstancias que lo han hecho realizar una serie de “acciones reflexivas”, y que dichas acciones lo han orillado a crear tecnología en beneficio de la misma causa por la que se batalla día con día.

En los últimos años la preocupación sobre el cambio climático y el efecto invernadero ha ido en aumento. Entre los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , NO_x , CFCs y SF_6 principalmente) destaca el dióxido de carbono, no tanto por su potencial de calentamiento, sino por las enormes cantidades liberadas a la atmósfera durante las últimas décadas.

Tanto es así, que la concentración media de CO_2 en la atmósfera antes de la revolución industrial era ~ 270 ppm y en la actualidad asciende a 375 ppm.

Las emisiones de CO_2 antropogénicas provienen aproximadamente en un tercio de la producción de energía a partir de combustibles fósiles, otro tercio del transporte y el resto de procesos industriales diversos (cementeras, siderurgia, refinerías, etc.) y edificios residenciales y comerciales.

Por otra parte, la utilización de biomasa como combustible, no resuelve el problema ya que no se dispone de la biomasa suficiente y ésta se caracteriza por un reducido poder calorífico y contenido en sales y en humedad elevados.

Las energías renovables, hidráulicas, eólicas y solares entre otras, también están incluidas dentro de la primera línea de actuación (utilización de fuentes de energía con menor contenido en carbono) para la disminución de las emisiones de CO_2 . No obstante, las energías renovables tienen también inconvenientes importantes, como son la intermitencia de sus fuentes, el desarrollo tecnológico y extensión geográfica insuficientes para poder abarcar la demanda actual y futura de energía.

El problema no es tan simple, más sin embargo las posibles soluciones están ya en pie y es un hecho que se tiene la tecnología a nivel planta piloto para proceder a aislar el CO_2 de nuestra atmósfera y confinarla en un lugar determinado para que nuestro planeta en su ciclo logre absorber el CO_2 restante que quede.

La Oxidación, Precombustión y Postcombustión son tecnologías presentes en la actualidad y que se llevan a cabo a nivel planta piloto para su posible aplicación a nivel industrial.

CAPÍTULO I.

ANTECEDENTES DEL

DIÓXIDO DE

CARBONO (CO₂).

1. HISTORIA DEL DIÓXIDO DE CARBONO.

Desde el inicio de los tiempos, desde que la humanidad cobra vida en la tierra, su procreación a lado de la naturaleza ha sido catastrófica desde el punto de vista ambiental, ya que ella misma ha creado todo lo que se encuentra a su alrededor, y a su vez, destruido donde se desenvuelve y crece, es como la mala yerba que crece y se esparce a su alrededor aminorando y desvaneciendo la belleza natural que se encuentra en su entorno.

Es tan triste pensar, que en un futuro todo lo que en un inicio existió, dejara de serlo porque el hombre, al tratar de florecer y expandirse deja manchas catastróficas a su paso, manchas que son difíciles de remplazar, dado a su incuestionable valor, es como el cáncer que envenena al organismo vivo, es como la peste que agobia al hombre mismo, es la plaga que debilita a la tierra, la enferma día a día, la entristece y agobia. Un hombre cruel y despiadado que busca cubrir sus arrogantes necesidades a costo de todo, sin pensar que él mismo se autodestruye solo, y no se da cuenta de ello, o no quiere ver el resultado de sus acciones moribundas, que perjudica y se lleva entre sus pies, a nuestra madre tierra.

Es verdad que la misma tierra desde su formación ha tenido cambios drásticos y repentinos, pero le ha tomado miles de años; más sin embargo en la actualidad lo que tomo miles de años, ahora solo es cuestión de días o meses para realizar un cambio irreparable. Es imperdonable verlo desde este punto de vista, aunque por el momento es forzoso preparar a nuestros hijos que son: “el futuro de los posibles prospectos que emergerán a la solución de los problemas actuales que nos agobian”.

Pero el planeta que hoy vemos sufrir, merece y requiere de una atención inmediata. El problema del efecto invernadero, un tema inquietante, un aspecto subversivo que nos aplasta día con día, porque afecta y reorienta el clima predominando el calor a temperaturas elevadas, ¿y esto que nos acarreará?, muy simple, problemas ecodemográfico que acrecentaran a la extinción de posibles seres orgánicos, hasta el hombre mismo posiblemente.

Darwin decía: “Solo el más apto sobrevive, solo aquel que se adapta a los cambios sobrevivirá”, y está en lo cierto, la naturaleza es tan sabia y en ella sobreviven los que se adaptan rápidamente y los que no, perecen.

Es sin duda un tema relevante y persistente que nos dará dolor de cabeza hasta no solucionar el problema con una meticulosa espontaneidad y severidad en solución.

Los gases de efecto invernadero se incrementan desde que inicia el hombre a tomar parte con la industria.

1.1 EL CALENTAMIENTO ACTUAL.

Los registros de las temperaturas indican que la temperatura media global, medida a dos metros del suelo, se ha elevado unas seis o siete décimas en un siglo. Este calentamiento no ha sido regular sino que ha ocurrido primordialmente durante dos períodos, (1915-1945) y (1975-1998).

Durante el primero de ellos las emisiones antrópicas de CO₂ eran muy escasas y no pudieron tener una influencia relevante en el calentamiento. Entre estos dos períodos de calentamiento se produjo entre 1945 y 1975 un período de leve enfriamiento que fue más importante en el hemisferio norte. Algunos lo atribuyen a la influencia de los sulfatos emitidos por la quema de carbón. Los sulfatos, al reflejar la luz solar, habrían reducido la entrada neta de radiación solar en la troposfera. Es una teoría que no casa bien con el hecho de que el enfriamiento, aunque más leve, también se manifestó en el hemisferio sur, de atmósfera mucho más limpia, y tampoco con el hecho de que la emisión de sulfatos en China e India fue posteriormente cuando más se intensificó.

Tampoco es verdad que la temperatura media global haya aumentado peligrosamente en las dos últimas décadas y que las medidas sean de extrema urgencia. En estas décadas el evento más influyente desde Enero de 1990 fue la erupción del volcán Pina tubo, en Filipinas, en Junio de 1991, que inyectó grandes cantidades de gases de azufre en la estratosfera. Los aerosoles sulfatados que se formaron permanecieron allí arriba, a más de 15 km de altitud, durante muchos meses, oscureciendo la atmósfera y enfriando el aire troposférico subyacente. La temperatura media global descendió unas 6 décimas de grado en superficie. El segundo evento importante fue el fenómeno oceánico de El Niño de 1997-98, en el Pacífico, que elevó la temperatura media global y la llevó al máximo del período. Luego la temperatura media global descendió pero subió algo en el 2001. Desde entonces, en estos últimos seis años la temperatura global no ha aumentado nada y estos últimos meses, por la influencia de una Niña, ha tendido más bien a enfriarse.

Desde que en 1979 se realizan mediciones satelitarias que permiten hacer comparaciones latitudinales mejor que antes, se ha observado que la tendencia térmica ha sido muy desigual en unas zonas y en otras. Ha habido un calentamiento en el Ártico y en las latitudes medias, pero este calentamiento no se ha manifestado ni en la Antártida, ni tampoco en la zona tropical.

Por otra parte, una de las inconsistencias más importantes entre lo observado en las últimas décadas y lo que hubiera debido ocurrir según los modelos que pronostican el calentamiento global son las diferencias de temperatura en la vertical de la troposfera, especialmente en la zona tropical. En esta región, según los modelos, el calentamiento debería ser mucho mayor en superficie que en la tropósfera media y alta. Sin embargo los datos observados no lo señalan.

Los errores se deben probablemente a una de las mayores incertidumbres del funcionamiento del clima: cómo afecta el calentamiento superficial a la humedad del aire y a la nubosidad en diferentes zonas y niveles del planeta. Se sabe, por ejemplo, que, en la troposfera tropical, en unas zonas el aire asciende muy húmedo y en otras descende muy seco. En algunos sitios el aire asciende en poderosas torres de nubes cumuliformes llevando hacia arriba el vapor de agua que acaba condensándose y que en forma de agua líquida precipita al suelo. Dependiendo de la mayor o menor violencia de las ascensiones, se forman nubes con más o menos agua precipitable. Algunas gotitas sobrantes se congelan en la alta troposfera y forman cirro estratos que se despegan de los cúmulos, se extienden en la horizontal y tienen un efecto de calentamiento extenso y notable, pues retienen la radiación infrarroja y apenas reflejan la radiación solar (su efecto invernadero es mayor que su efecto albedo).

Según la teoría de Richard Lindzen, si aumenta la temperatura del mar, aumenta la violencia de las ascensiones y las gotas de las nubes son más gordas, por lo que precipitan más y más rápido y dejan seca la alta troposfera, sin posibilidad de que se formen esos extensos cirros estratos desgajados de las columnas ascendentes. Por lo tanto se produce un feedback negativo (conjunto de reacciones o respuestas que manifiesta un receptor respecto a la actuación del emisor), en este caso negativamente. A más temperatura del agua del mar, menos cirros y, por lo tanto, enfriamiento. Una teoría que algunos dicen que se cumple y otros que no.

Lo que está claro es que las variaciones de la humedad del aire y del tipo de nubes en los trópicos, y fuera de los trópicos, dependen no sólo de la evaporación provocada por la temperatura, sino también de las precipitaciones. Con lo mal que se entiende aún la formación de las nubes y de las precipitaciones, y, sobre todo, con lo mal que se sabe pronosticar la lluvia, es difícil atribuir a un determinado incremento del CO₂ un determinado aumento de la temperatura. En realidad, sin ningún otro efecto de feedback, como los cambios de la nubosidad y de la concentración de vapor de agua en el aire, los modelos indican que el calentamiento provocado por la duplicación del CO₂ (que se alcanzará dentro de muchas décadas) sería tan sólo de apenas 1°C. Todo el calentamiento extra tan temido sería causado por efectos

indirectos, aún mal conocidos y mal modelizados. Mientras la industria, que impulsa las economías todos los días se torna como un foco esencial para el desarrollo de la vida vegetal y no como se simboliza actualmente, una industria emergente que llega a ocupar un punto esencial en el desarrollo de la vida verde. A la atmosfera se mandan miles de toneladas de gases y entre ellas figura el dióxido de carbono, un gas que es vital para la vida humana, porque las plantas las necesitan para la fotosíntesis y a su vez nosotros requerimos que las plantas realicen la fotosíntesis y como producto de ello se nos da oxígeno para poder vivir. Qué curioso, pero esa es la realidad que no queremos ver.

Es aterrador pensar que en un futuro alcancemos concentraciones aún mayores, que los actuales, y eso es posible si no tomamos en cuenta las acciones que posibilitarían a apaciguar dichas emisiones hacia nuestro cielo, si tomamos conciencia y buscamos las formas más aptas para lograr alcanzar todo cuanto queramos sin la necesidad de enfrascarnos en utilizar los combustibles fósiles que están por agotarse, si empleamos tecnologías limpias podremos ver un mundo lleno de cosas buenas, llevar una vida sin la necesidad de pensar, en que afectara nuestro planeta, planear, formalizar y ejecutar, es quizás la razón tecnológica actual para alcanzar los objetivos ambientales actuales.

El dióxido de carbono (CO_2), es uno de los gases más abundantes en la atmósfera y juega un papel importante en los procesos vitales de plantas, animales y, en definitiva del ser humano, como en la fotosíntesis, la respiración o en diversas actividades internas del cuerpo humano. El CO_2 , en cantidades adecuadas, es uno de los gases de efecto invernadero que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable. Y es que sin el CO_2 , la Tierra sería un bloque de hielo.

Sin embargo, un exceso de CO_2 provoca un incremento de la temperatura, dando lugar al calentamiento global. Los gases considerados promotores del efecto invernadero, son:

- ✓ CO_2 . Dióxido de carbono.
- ✓ CH_4 . Metano.
- ✓ N_2O . Óxido nitroso.
- ✓ S_2O . Óxido de azufre.
- ✓ CFC. Clorofluorocarbono.
- ✓ O_3 . Ozono.
- ✓ Vapor de agua.

El incremento de las emisiones de dióxido de carbono, provoca alrededor del 50-60% del calentamiento global. La combustión de combustibles fósiles (materias primas

que se emplea en combustión y que se han formado a partir de las plantas y otros organismos vivos que existieron en tiempos remotos en la Tierra. El carbón en todas sus variedades, el petróleo y el gas natural en sus distintas presentaciones). Para la generación de energía que provoca alrededor del (70-75%) de las emisiones de CO₂, mientras que el resto de las emisiones son provocadas por los tubos de escape de los vehículos.

Aunque podemos tomar en cuenta el proceso, denominado ciclo del carbono, y como tal veremos que la realidad aparente a la que estamos atacando es beneficiosa hasta cierto grado y como tal sigue las siguientes pautas:

- Se producen emisiones derivadas de las actividades humanas como: combustión de productos fósiles (carbón, petróleo, gas, etc.) para la generación de energía, gases expulsados por los tubos de escape, consumo familiar de energía, los gases producidos por incendios forestales y quemas de restos agrícolas, producción de cemento y hormigón, así como de hierro y acero, entre otros procesos industriales.

- El CO₂ también se origina en procesos naturales como la propia respiración animal y vegetal, la descomposición de materia orgánica (basuras, cadáveres animales y vegetales, etc.), las erupciones volcánicas, los incendios naturales.

- La concentración de CO₂ en la atmósfera se elimina constantemente como parte del ciclo del carbono. Si esto no sucediera, el mundo se calentaría y sería tan caliente como Venus. Los mecanismos que retiran el carbono de la atmósfera se llaman "SUMIDEROS DE CARBONO".

1.2. FOCOS EMISORES DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

Las industrias químicas además de la industria eléctrica y la automotriz han representado hasta en nuestros días la mayor apertura tecnológica, como, la contaminación demagógica hacia nuestro medio ambiente.

Dentro de estas tres grandes vertientes se consideran apta a las industrias químicas y eléctricas pioneras en ser aplicables tecnologías de captura debido a sus características estacionarias, a excepción de la automotriz que se encuentra en movimiento y no existe de momento alguna tecnología que se adapte y se capture CO₂.

1.3. INDUSTRIAS.

El impacto ambiental que las industrias tienen sobre el medio ambiente y los recursos naturales ha sido considerable, no tan sólo como resultado del crecimiento de la producción, sino también gracias a que dicho crecimiento se concentró en sectores de alto impacto ambiental.

En este contexto y en términos de sectores contaminantes, es de notarse la importancia creciente de la producción de electricidad, seguida por la producción minera y manufacturera. Se calcula que, entre 1950 y 1970, la intensidad de la contaminación, medida como el volumen anual en kilogramos de emisiones por millón de dólares de producto, creció en un 50%, sobre todo por la contribución de empresas intermedias. De 1970 a 1989, dicha intensidad creció otro 25%, el cual se atribuye al crecimiento de las inversiones del sector público en las industrias petroquímica y de fertilizantes, ocurrido principalmente en el período de 1978 a 1982.

Una de las limitantes de la política ambiental es que no existe un inventario exhaustivo de contaminantes totales generados por el sector industrial. Por tanto, se ha procurado estimar la importancia de las diferentes industrias a través de métodos indirectos. Destacan entre los giros industriales que más afectan el ambiente la petroquímica básica, la química y la industria metalúrgica, que en total pueden representar más de la mitad de la contaminación generada por el sector. En materia de residuos peligrosos, las industrias químicas básicas, secundaria y petroquímica son las principales generadoras de residuos industriales, les siguen las industrias metalmeccánicas y metalúrgica básica y la industria eléctrica.

Dada la desigual distribución geográfica de la industria y la dispar presencia de tipos de industrias en cada región, sus efectos ambientales difieren sustantivamente. Se puede distinguir estados con una alta intensidad de generación de contaminantes con relación a su producto, como parece ser el caso de: (Chiapas, Guanajuato, Querétaro, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz). Otros estados, en cambio, a pesar de su alta concentración de industrias, presentan una baja intensidad de contaminación por unidad de producto industrial, como es el caso de los estados de: (México, Puebla, Jalisco, Nuevo León y el Distrito Federal). Esto indicaría que la industria de las principales zonas metropolitanas del país es, por unidad de producto, considerablemente más limpia que su equivalente en muchos otros estados y regiones. Cabe señalar que el análisis anterior no considera la existencia de equipo de control, sino las características tecnológicas de los procesos industriales analizados, si bien una parte importante de las industrias de mayor tamaño han incorporado equipos de control atmosférico y de tratamiento de aguas residuales, lo que hace disminuir sensiblemente su aportación medida indirectamente.

Se enfrenta, así, un problema complejo que tiene relación con la estructura del sector industrial en México, que se ilustra adicionalmente en los puntos siguientes:

- ✓ La industria azucarera tiene una tecnología con 45 años de antigüedad en promedio y presenta efectos contaminantes sobre el agua derivados de su elevado consumo energético, sus descargas de alta temperatura y gran

contenido de materia orgánica (bagazo, cachaza y vinazas). Además, contribuye a la contaminación del aire por la utilización de combustóleo y bagazo, careciendo totalmente de equipos de control de emisiones.

- ✓ La industria minero-cuprífera presenta efectos contaminantes del agua por descargas ácidas, de metales, cianuros de sodio, materiales reactivos, aceites lubricantes usados y sólidos suspendidos, y del aire por partículas de polvo derivadas de sus procesos.

- ✓ La industria siderúrgica afecta al agua con descargas ácidas y amoniacaes; al aire con polvos, gases y humos provenientes del carbón y gas natural en procesos de combustión ineficientes.

- ✓ La industria del cuero genera residuos de “descarne”, “raspa”, polvo de piel cromada y recorte; además, contamina el agua con sales, cromo, materia orgánica, grasas, taninos vegetales y sintéticos, y el aire con polvos, gases y humos.

- ✓ La industria de celulosa y papel contamina el agua con materia orgánica y sustancias químicas cloradas y el aire como resultado de procesos de combustión.

- ✓ En lo que se refiere a la minería en general, los principales riesgos derivan de la fase de explotación, principalmente de la operación de presas de sales. La misma puede generar escurrimientos y arrastres de residuos minero-metalúrgicos peligrosos de alta afectación ambiental, así como la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores. Igual ocurre en los procesos de beneficio de minerales, que pueden tener efectos ambientales negativos a través de sus aguas residuales, materiales y sustancias peligrosas y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera. Estas últimas son particularmente importantes en los procesos de fundición y refinación.

- ✓ Finalmente, la actividad petrolera involucra acciones de grandes dimensiones que afectan drásticamente al ambiente. Ello es particularmente cierto en relación a las actividades de refinación y petroquímicas que, aunque se convierten en un importante estímulo a la formación de polos industriales, muestran por lo general niveles altos de contaminación, así como de deterioro de su entorno natural.

1.4. INDUSTRIA ELÉCTRICA.

Los sistemas de producción de electricidad han presentado un enorme foco de emisión independiente del proceso por el cual se obtenga la energía eléctrica, entre las que podemos mencionar son las siguientes:

Térmico de lignito. Es un combustible fósil de poder calorífico relativamente bajo y gran proporción de azufre además de componentes inertes que en la atmosfera causan daños muy severos al precipitarse o en su caso el azufre una lluvia acida que puede ser letal para las plantas además de construcciones expuestas.

Térmico de carbón. El carbón es un combustible fósil de mediano poder calorífico, bajo cuya denominación se incluyen mezclas de hullas y antracitas.

Térmico de fuel-oíl. Es el principal derivado del petróleo, un combustible fósil de alto poder calorífico, utilizado por sus características termoquímicas para generar la electricidad, más sin embargo como desecho se tiene CO₂ en la combustión de este combustible fósil.

Térmico de gas natural. El gas natural es también un combustible fósil de alto poder calorífico que usa en la industria eléctrica para generar energía y como consecuencia de la combustión de este combustible se genera dióxido de carbono que se emite a la atmosfera, participando en el calentamiento global.

Térmico nuclear. Estas centrales utilizan como combustibles derivados del uranio natural.

Es casi probable que la industria sea la causante de todos los problemas actuales al hacer uso irracional de los combustibles fósiles, más sin embargo quizás las expectativas económicas pueden más, que, formar parte del cuidado de nuestro planeta.

1.5. EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y DEL CALENTAMIENTO GLOBAL VAN DE LA MANO.

La mayor parte de la atención al calentamiento global se concentra en un producto de combustión específico: el dióxido de carbono, porque se culpa su acumulación a más de la mitad del calentamiento causado por la actividad humana. Sin que sea directamente dañino a las plantas y a los humanos, no se lo reconoce en muchos países como un contaminante atmosférico. Más aún, las soluciones para el calentamiento global y para la contaminación convencional del aire están interconectadas. Cualquier incremento en las temperaturas globales impulsará también la formación de los contaminantes convencionales, como: el ozono y las partículas finas, que se forman más rápidamente en los días calientes. Por lo tanto reduciendo los comúnmente reconocidos contaminantes atmosféricos podría ayudar a suprimir el calentamiento global y viceversa.

El ozono, monóxido de carbono, las partículas finas y otros compuestos se los regula como contaminantes porque causan enfermedades humanas y muerte. En realidad, el único contaminante común que no contribuye al calentamiento global, es el dióxido de azufre. Éste forma partículas finas de sulfato que tienen en realidad un efecto de enfriamiento. El resto, juntos con el dióxido de carbono y el metano, son los llamados “gases de invernaderos”.

1.6. EMISIONES ACTUALES A LA ATMÓSFERA DE CO₂ DERIVADAS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

En México el consumo de combustibles fósiles para generar energía eléctrica según información de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), generan alrededor de 29 % de las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera. Los combustibles fósiles se componen sobre todo del carbón y de los elementos del hidrógeno, las dos emisiones principales del consumo de combustibles fósiles son el CO₂ y agua, que pueden funcionar como gases de efecto invernadero. Los ciclos del agua se han estudiado bastante bien y hasta la fecha no han sido un tema central de preocupaciones en el calentamiento global. No así las emisiones de CO₂, que debido a sus ciclos complejos y su volumen significativo, se consideran como preocupación.

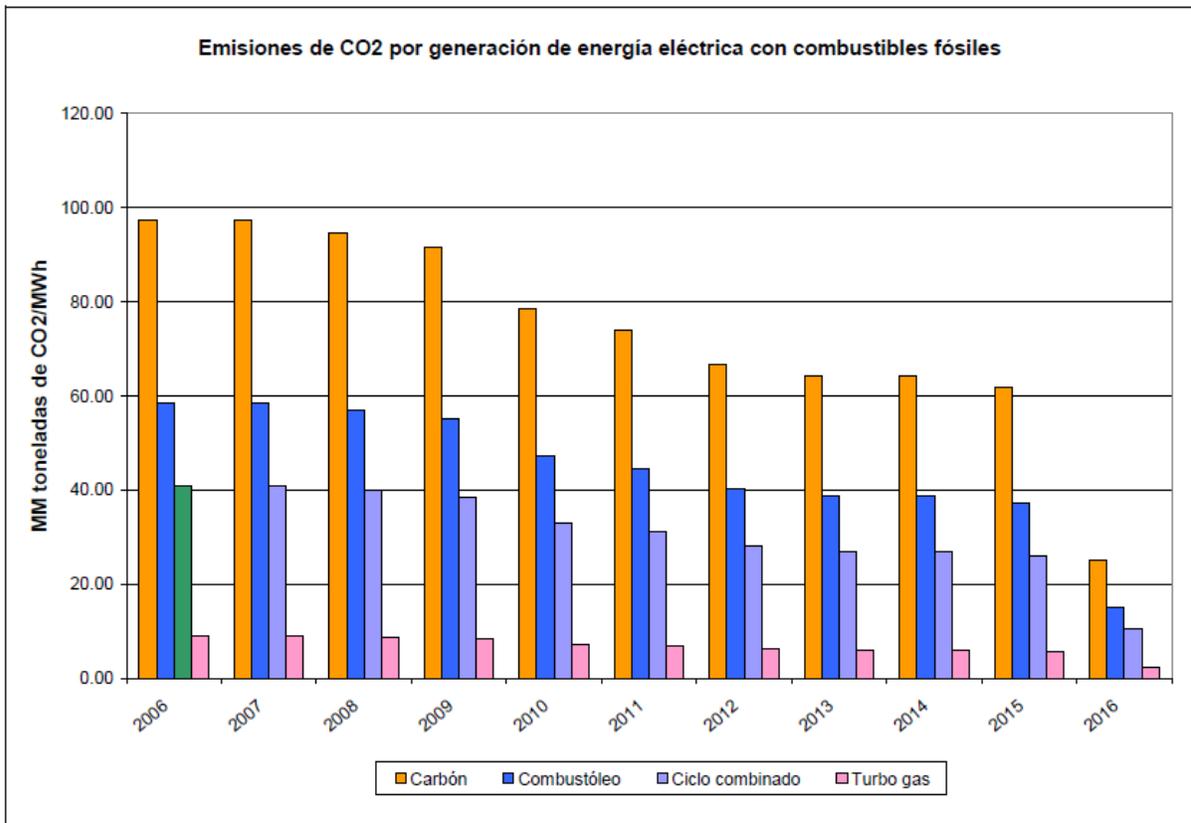
En este sentido, las políticas de energía y de medio ambiente en curso en varios países, se están orientando a favorecer un desarrollo más rápido de nuevas trayectorias tecnológicas que propicien la descarbonización, es por esto que representantes del mundo entero que se reunieron en Brasil para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en 1992,

convinieron en principio en un conjunto de propuestas para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los países desarrollados más ricos se comprometieron a mantener en el año 2000 las emisiones atmosféricas en los niveles de 1990. Pero los progresos realizados desde dicha Cumbre para la Tierra han sido desiguales y en ciertos casos insignificantes. Las tasas de emisión de CO₂ se han reducido solo ligeramente en algunos países industrializados principalmente debido a la desaceleración de sus economías y en la mayoría de los países en desarrollo han aumentado en forma considerable debido a la creciente demanda energética y a que se recurre a los combustibles fósiles.

También es improbable que cambien las modalidades de consumo de los recursos por el hecho de que los combustibles fósiles se vuelvan más escasos o más caros. Según el Instituto de los Recursos Mundiales, la producción y el consumo de combustibles fósiles siguen en aumento en casi todas partes. Además, se estima que las reservas comprobadas de petróleo, gas natural y carbón pueden satisfacer respectivamente la demanda de los próximos 40, 60 y 230 años aproximadamente. En las dos próximas décadas, la India proyecta triplicar y China duplicar la utilización de carbón para generación de electricidad.

En un esfuerzo para reducir las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), algunos países optan actualmente por el gas natural, pero su consumo también produce CO₂ (aunque menos que el carbón o el petróleo) y, por otra parte, los escapes de metano durante la extracción, traslado y distribución de gas natural representan en su conjunto entre el 5 y el 10%, una magnitud que contrarresta con creces la ventaja de emisiones de CO₂ más reducidas.

En vista de las perspectivas de un constante aumento del consumo de combustibles fósiles para la producción de electricidad y de la amenaza creciente para el medio ambiente mundial, la energía renovable puede desempeñar un papel importante para los países que necesitan crecientes suministros energéticos sin que aumenten las emisiones de GEI, como es el caso de México.



Grafica 2. Emisión de Dióxido de carbono por el uso de combustibles fósiles en México. Perspectivas del sector eléctrico 2006-2015, pp. 89-91 México 2006.

En la gráfica se muestra que la generación de energía eléctrica con tecnología con combustión a base de carbón emite aproximadamente 97.2 millones de toneladas al año de CO₂ por MWh, mientras que la generación de energía eléctrica con la tecnología de turbo gas emite alrededor de 8.9 millones de toneladas de CO₂. Esto sucede actualmente en México, ya que el porcentaje de utilización de combustibles fósiles son del orden de 24.7, 33, 4.6 y 32.2 % para el combustóleo, ciclo combinado con gas natural, turbo gas y carbón respectivamente.

En la gráfica 2 se aprecia que a partir del 2010 hay una disminución en las emisiones y esto es debido a que actualmente en la planeación del sector eléctrico mexicano se prevé la diversificación de combustibles y se incremente la capacidad instalada de energía eléctrica a partir de gas natural y renovable.

1.7. EL FUTURO ENERGÉTICO.

La combinación de crecimiento demográfico, desarrollo económico e industrialización en el mundo entero significa que el consumo mundial de energía continuará aumentando. Estas tendencias, sumadas al mantenimiento del empleo de combustibles fósiles para producir energía eléctrica, también significan que las emisiones GEI continuarán aumentando en el mundo entero. Aun con medidas estrictas de reducción, las proyecciones actuales no muestran una estabilización de las emisiones hasta aproximadamente el año 2050.

Por otro lado, el progreso tecnológico de las fuentes renovables de generación eléctrica, en particular la biomasa, geotérmica, solar fotovoltaica, solar foto térmica y viento, ha sido importante al grado de rebasar las expectativas relacionadas con las mejoras de sus costos de producción. Esto ha significado que algunas de estas tecnologías sean ya competitivas y otras estén en el umbral de serlo. Se prevé que este progreso tecnológico va a continuar en el futuro próximo y lejano. No obstante que su incursión global en los sistemas energéticos se considera aún marginal, en algunos países las fuentes renovables de energía se han difundido en importantes nichos de aplicación, en particular en la generación eléctrica, como en España, Alemania y Dinamarca. En los últimos años han crecido las expectativas de una difusión mayor de las fuentes renovables de energía debido a su alentador progreso tecnológico, las crecientes restricciones ambientales y la inestabilidad de los precios de petróleo y de gas natural.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) predice un incremento importante de la demanda en el consumo de energía primaria hasta el año 2030. En el sector de la Energía Eléctrica, se espera que la demanda se duplique, requiriéndose de la instalación de 5000 GWe de nueva potencia. Este aspecto unido a otros de carácter económico y de seguridad de suministro, hace que los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) deban de permanecer como pieza clave en la escena energética.

En una escala global, los escenarios y las proyecciones realizadas para 2030 indican un aumento en la demanda de carbón, gas natural, petróleo, y que:

La energía nuclear y las renovables se utilizarán, pero a una escala menor que los combustibles fósiles.

Si no se ejecuta una política de medidas e incentivos para reducir las emisiones, estas crecerán hasta doblar en 2030.

Los combustibles fósiles seguirán dominando el sistema energético, con una cuota de entorno al 85%.

La unión europea como uno de los mayores consumidores de energía y mayores emisiones de CO₂, deberá de contribuir intensificando sus esfuerzos, sobre todo en el ámbito de la transferencia tecnológica.

1.8. AUTOMOTRIZ.

El automóvil genera el 83% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes del transporte, sector que representa, a su vez, el 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos son datos de un estudio realizado por el Observatorio de la Movilidad Urbana, un nuevo organismo creado por el Gobierno para contribuir a la lucha contra la contaminación y la mejora de la calidad del aire en las ciudades.

La cantidad de dióxido de carbono emitido por los viajes en coche es directamente proporcional a la cantidad de combustible utilizado. Eso se ve reflejado en las emisiones de CO₂ de los autos. El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero. Las emisiones de CO₂ de los autos son parte de la contribución humana al crecimiento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera que se cree por la mayoría de los científicos juegan un papel importante en el cambio climático. Los vehículos de motor se calcula que generan alrededor del 20 por ciento de las emisiones de CO₂ provocadas por el hombre, con los coches de pasajeros aportando alrededor del 12 por ciento.

Otro componente importante de la contaminación del aire a causa de los automóviles es el monóxido de carbono, el cual entra al aire cuando los motores no queman completamente el combustible que utilizan. Los coches, camiones y vehículos similares producen un 95 por ciento del monóxido de carbono (CO) en el aire.

Este gas venenoso afecta a las personas que tienen enfermedades respiratorias o enfermedades del corazón, ya que restringe la cantidad de oxígeno que llega a la sangre y luego a los órganos y tejidos del cuerpo. El CO causa síntomas en las personas sanas cuando aumentan los niveles en el aire. Para prevenir este tipo de terribles efectos es muy importante que tengamos conciencia en el uso del automóvil y el ahorro de combustible para reducir las emisiones de CO₂ de los autos.

Aparentemente, la actividad que el hombre realiza al encender el motor del automóvil, parece inofensivo, más sin embargo no es así, existe una contaminación radical, para poder darnos una idea de esta parte crucial citaremos como ejemplo lo siguiente y en ella compararemos la realidad que ignoramos:

- VEHÍCULOS PEQUEÑOS.

(Hasta 14 km por litro)= 428 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido.

- VEHÍCULOS ESTÁNDAR.

(Hasta 7.5 kilómetros por litro)=798 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido.

- CAMIONETAS.

(Hasta 6 kilómetros por litro)=1139 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido.

1.9. PROTOCOLO DE KIOTO.

Es el acuerdo institucional más importante en relación al cambio climático, que tiene su origen en la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992.

Busca reducir las emisiones de GEIs (Gases de Efecto Invernadero) de los principales países Industrializados con el fin de que en el periodo que va de 2008 a 2012 esas emisiones descenden un 1.8%, “donde según la propuesta inicial de 1997, los países firmantes debían lograr que en el plazo que va de 2008 a 2012 las emisiones de GEIs (Gases de Efecto Invernadero)descendieran un 5.2% por debajo de las registradas en 1990 en la Cumbre de Bonn (Julio del 2001), ese límite se ha fijado en un 1.8%, ya que de lo contrario se corría el riesgo de que el protocolo no se ratificara”.

1.9.1 ORIGEN DEL PROTOCOLO DE KIOTO.

El protocolo de Kioto tiene su origen en la Convención Marco de las Naciones Unidas, en nueva York, el 9 de mayo de 1992. Esta Convención es fruto de un proceso internacional de negociación a raíz de la publicación del Primer informe de evaluación del panel Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC). En este informe se confirmaba la existencia y peligrosidad del fenómeno del cambio climático.

La Convención Marco sobre el Cambio climático busca “la estabilización de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático” y establece una estructura general para los esfuerzos intergubernamentales encaminados a resolver

el desafío del cambio climático. Reconoce que el sistema climático es un recurso compartido que puede verse dañado por todas las actividades (incluyendo las industriales) que emiten Dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEIs).

En virtud de esta Convención, los países firmantes:

- Recogen y comparten la información sobre las emisiones de GEIs, las políticas nacionales y las prácticas óptimas en materia de reducción de emisiones.
- Ponen en marcha estrategias nacionales para abordar el problema de las emisiones y adaptarse a los efectos previstos del cambio climático, incluida la prestación de apoyo financiero y tecnológico a los países en desarrollo.
- Cooperan para prepararse y adaptarse a los efectos del cambio climático.

Sin embargo, cuando se adoptó la Convención, los Estados Parte sabían que sus compromisos no serían suficientes para abordar en serio los problemas del cambio climático. El órgano supremo de la Convención es la Conferencia de la Partes (COP), que reúne anualmente a todos los Estados que han ratificado la Convención. En la primera de las Conferencias de las Partes (COP₁) en Berlín en 1995, las Partes pusieron en marcha una nueva ronda de conversaciones para decidir la adopción de compromisos más firmes y más detallados para los países industrializados. Después de dos años y medio de negociaciones intensas, se adoptó el Protocolo de Kioto en la COP₃ de Kioto (Japón), el 11 de diciembre de 1997.

Debido a la complejidad de las negociaciones, quedaron sin resolver un considerable número de cuestiones, por ejemplo, las trascendentales normas que regulaban el funcionamiento de este Protocolo. Aunque 84 países firmaron el Protocolo, lo que significaba que tenían intención de ratificarlo, muchos se resistían a hacer que el Protocolo entrara en vigor, antes de tener una idea clara sobre las normas del tratado. Por ello, se inició una nueva ronda de negociaciones para especificar las normas concretas del Protocolo de Kioto, que se organizó en paralelo con las negociaciones sobre las cuestiones pendientes en el marco de la Convención. Estas negociaciones terminaron en la COP₇ con la adopción de los Acuerdos de Marrakech (2001), que establecían normas detalladas para la aplicación del Protocolo de Kioto así como algunas medidas importantes para la aplicación de la Convención.

El Protocolo de Kioto tiene los mismos objetivos, principios e instituciones de la Convención, pero refuerza ésta de manera significativa, ya que a través de él las

Partes incluidas en el anexo I (países industrializados que en 1992 eran miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) se comprometen a lograr objetivos individuales y jurídicamente vinculantes para limitar o reducir sus emisiones de GEIs. Sólo las Partes a la Convención que sean también partes al Protocolo (es decir, que lo ratifiquen) se ven obligadas por los compromisos del Protocolo. Los objetivos individuales para las Partes incluidas en el anexo I se enumeran en el anexo B del Protocolo de Kioto. Entre todos suman un total de recorte de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 5% con respecto a los niveles de 1990 en el periodo de compromiso de 2008-2012. El 31 de mayo de 2002, la Unión Europea ratificó el protocolo de Kioto, que entró en vigor el 16 de febrero de 2005, tras la ratificación de Rusia ya que para su entrada en vigor debían ratificarlo 55 países que representaran el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, varios países industrializados se negaron a ratificar el protocolo, entre ellos, Estados Unidos y Australia.

1.9.2 CONTENIDO DEL PROTOCOLO DE KIOTO.

Un sencillo documento de 10000 palabras contiene el acuerdo institucional más importante en relación al cambio climático. Su objetivo es reducir las emisiones de GEIS de los principales países industrializados según la propuesta inicial de 1997, los países firmantes debían lograr que en el plazo que va de 2008 a 2012 esas emisiones descendieran un 5.2 % por debajo de las registradas en 1990. En la cumbre de Bonn (julio de 2001) ese límite se ha fijado en un 1.8%, ya que de lo contrario se corría el riesgo de que el protocolo no se ratificara.

Los principales componentes del protocolo de Kioto son los que a continuación se exponen:

- Gases contemplados.
- Objetivos.
- Países.
- Mecanismos flexibles.

1.9.3 GASES CONTEMPLADOS.

El protocolo de Kioto se aplica a las emisiones de seis gases de efecto invernadero:

- Dióxido de carbono (CO₂).

- Metano (CH₄).
- Óxido Nitroso (N₂O).
- Hidrofluorocarbonos (HFC).
- Perfluorocarbonos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF₆).

1.9.4 OBJETIVOS DEL PROTOCOLO DE KIOTO.

El protocolo de Kioto marca objetivos obligatorios relativos a las emisiones de GEIs para las principales economías mundiales que lo han aceptado. Estos objetivos individuales van desde una reducción del 8% hasta un crecimiento máximo del 10% respecto a las emisiones del año base, que se ha fijado en 1990 (se podrá utilizar el año 1995 para los gases fluorados) y según cita el protocolo “con mira a reducir el total de sus emisiones de los GEIs a un nivel inferior de no menos de un 5% al nivel de 1990 en el periodo de compromiso 2008-2012” a nivel mundial.

En casi todos los casos, incluso en todos aquellos que tienen un crecimiento máximo de las emisiones del 10% sobre 1990, estos límites obligan a unas reducciones importantes sobre las emisiones proyectadas. Además de para el periodo de compromiso 2008-2012, se prevé el establecimiento de objetivos obligatorios futuros para periodos de compromisos posteriores de 2012.

1.9.5 PAÍSES FIRMANTES.

Los compromisos contraídos en virtud del protocolo de Kioto varían de un país a otro. Así, el objetivo de recorte global del 5% sobre los niveles de GEIs de 1990 para los países desarrollados oscila entre el recorte del 28% de Luxemburgo y el 21% de Dinamarca y Alemania; y un incremento máximo de las emisiones de del 25% en Grecia y de un 27% en Portugal.

A continuación se presenta un esquema de los objetivos de emisión de GEIs contraídos por las diferentes partes:

Comunidad Europea, Bulgaria, República Checa, Estonia, Lituania, Mónaco, Rumania, Liechtenstein, Eslovaquia, Eslovenia, Suiza, Letonia.	-8%
Estados Unidos de América	-7%
Canadá, Hungría, Japón y Polonia.	-6%
Croacia.	-5%
Nueva Zelanda, Federación Rusa, Ucrania.	+0%
Noruega.	+1%
Australia.	+8%
Islandia.	+10%

La Unión Europea ha asumido un objetivo conjunto de reducción del 8% de sus emisiones de 1990 para 2008-2012, si bien esta reducción ha sido distribuida de forma diferenciada entre sus estados Miembros en función de sus características individuales. Así, el Estado Español tiene un objetivo de incremento máximo del 15% de sus emisiones de GEIs respecto a las generadas en 1990.

1.9.6 QUE SUCEDE DESPUÉS DEL PROTOCOLO DE KIOTO.

Después del Protocolo de Kioto los Países que se encontraban en ella y que habían firmado dicho protocolo, ratificaron, lo propuesto y el resto no volvieron. Dentro de ellos los Estados Unidos, es realmente vergonzoso ver esta posición que dicho País Norteamericano tomo en su momento. Siendo este uno de los más contaminantes a nivel mundial, más sin embargo lo hizo y qué decir de los otros, la misma actitud que tomo EU, fue la pauta que encasillo a la Unión Europea y Asiática para darle seguimiento al problema que desde ese momento ya estaba presente.

Como EU, figuraba como potencia económica en comparación con los otros países, se le dio la prioridad pero la dejo y Rusia toma la iniciativa y ratifica el protocolo, quedando como anfitrión en relación al problema climático. Los sucesos se vieron ya contemplados y se le dio seguimiento. Pocos países en transición económica entraban en el área y también se contemplaba que en el protocolo, enmarcada por sus artículos, los países que dieran seguimiento a minimizar el problema climático y desarrollar la tecnología correspondiente para tratar el problema podrían vender dicha tecnología a los países que en su momento contemplaran la situación de apaciguar sus emisiones de CO₂ a la atmosfera.

El mercado se abre en cuestiones tecnológicas, las inversiones afloran, España por su parte invierte en investigaciones y se da el lujo de crear un sistema de

investigación a nivel planta piloto, desarrollando la tecnología más sofisticada y dando prioridad a disminuir el problema. Es un hecho ya y la planta piloto, está en proceso de pruebas, y la tecnología empleada en ella para dicho sistema y la más investigada dentro del ramo es la “OXICOMBUSTIÓN”, este sistema ya se encuentra maduro, y la situación climatológica parece cambiar una vez más.

Las tecnologías vienen a dar otra perspectiva a la humanidad, pero no hay que perder de vista a la parte ejemplar que debe de tomar todo mundo, tomar con claridad el problema y con suma responsabilidad afrontarla, no solo con firmar un protocolo nos desfasamos de la situación, no es así, de esta forma no funciona, la prioridad más abrupta sería que la sociedad mundial conscientemente abra los ojos y de manera inmediata ponga su granito de arena, no basta con que las industrias dentro y fuera de los países pongan las cartas sobre la mesa, no importa que los gobiernos nos multen, no hay una solución placentera más que la sociedad, ella debe de darle la solución, una solución mundialmente consciente, a favor de nuestro planeta y de todos aquellos seres que en este planeta coexistimos. Quizás sea tonto pensar de esta forma, más sin embargo el interés primordial es nuestro y como tal, debemos tomarlo y no soltarlo hasta ver que la situación se ha apaciguado rotundamente. Tal vez sea este la forma de corregir nuestros errores que de momento claramente se ven influenciado por nuestra ceguera social conjunta. Por otro lado, la parte educativa se verá inmiscuido si la tomamos y la forjamos día con día, con nuestros hijos que son los futuros dirigentes de este planeta en un futuro próximo, un futuro que parece marchitarse, un futuro incierto, donde la causa o el causante de esta triste historia es el mismo hombre.

CAPÍTULO II.

PANORAMA GLOBAL

DEL DIÓXIDO DE

CARBONO (CO₂).

2. PRINCIPALES SUMIDEROS DE CARBONO, UNA CAPTURA INDIRECTA.

a) LOS BOSQUES.

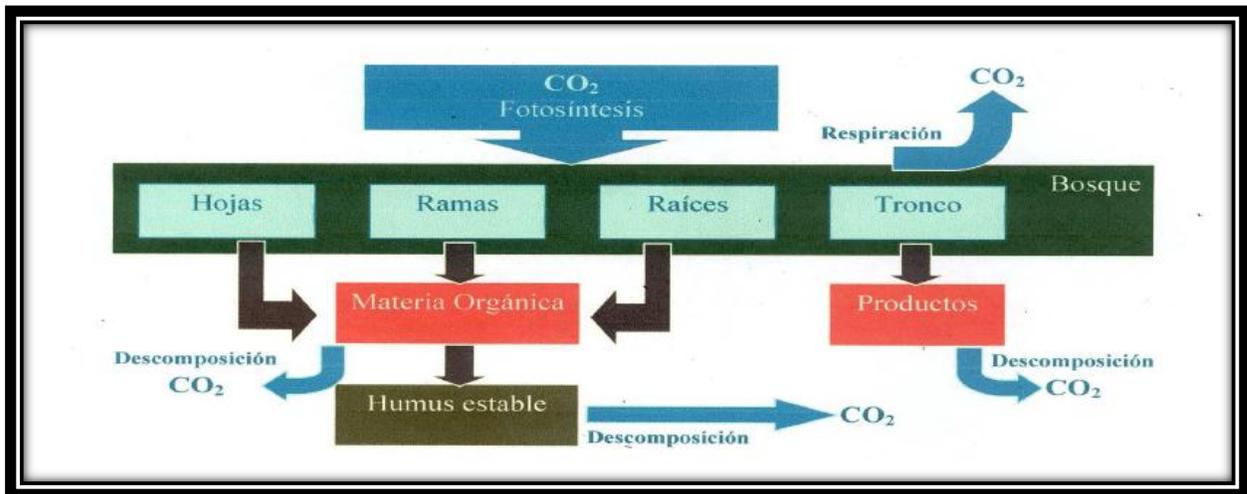
Los árboles son, los principales sumideros naturales del planeta, esenciales para el ciclo de carbono. Se acumulan enormes cantidades de carbono en la madera y en el ecosistema a través de la fotosíntesis. Absorben CO₂ de la atmósfera, almacenan una parte del carbono tomado, y devuelven oxígeno a la atmósfera. Las especies pioneras, de crecimiento rápido (por ejemplo, el álamo, el sauce o el abedul, por lo general absorben poco carbono. Las maderas duras son más densas y almacenan más carbono y durante más tiempo, pero por lo general crecen más lentamente (siglos o milenios). En la madurez, la absorción es menor, pero el carbono representa el 20% de su peso en promedio. Cuando el árbol muere, la madera es descompuesta por bacterias, hongos e invertebrados, reciclando su carbono como biomasa, materia orgánica muerta (*cadáveres y excrementos de estos organismos*) y, en forma de gases (CO₂ y metano, liberados a la atmósfera o en el agua). Los bosques y otros ecosistemas siguen almacenando o reciclando ese carbono a través de la regeneración natural. Sólo los bosques templados acumulan carbono, los bosques tropicales están a menudo en equilibrio (fuente=sumidero). A veces, a nivel local, ocurre que los árboles muertos, juncos y plantas de los pantanos se descomponen lentamente y de manera imperfecta, en condiciones anaeróbicas, bajo la superficie de los pantanos, produciendo turba (primera etapa del proceso por el que la vegetación se transforma en carbón mineral. Se forma como resultado de la putrefacción y carbonificación parcial de la vegetación en el agua ácida de pantanos, marismas y humedales. La formación de una turbera es relativamente lenta como consecuencia de una escasa actividad microbiana, debida a la acidez del agua o la baja concentración de oxígeno. El paso de los años va produciendo una acumulación de turba que puede alcanzar varios metros de espesor, a un ritmo de crecimiento que se calcula de entre medio y diez centímetros cada cien años). El mecanismo es lo suficientemente lento para que, en la mayoría de los casos, el pantano crezca lo suficientemente rápido para fijar más carbono atmosférico que el que se libera por la descomposición. Un cuarto del carbono absorbido por los bosques lo es por las plantas y el suelo. Los bosques a veces puede llegar a ser *fuentes* de CO₂ (lo contrario de un sumidero de carbono), especialmente en caso de incendio, o temporalmente después de grandes desmontes o cortas rasas.

b) LOS OCÉANOS.

- El dióxido de carbono atmosférico también se almacena en los mares y océanos, que actúan como grandes sumideros ya que es muy soluble en agua aumentando cuanto más baja es su temperatura.

- Muchas formas de vida marina extraen carbono y oxígeno del agua del mar y lo combinan con calcio para producir carbonato de calcio (CaCO₃). Éste es utilizado

para producir conchas, espinas, huesos y otras partes duras del cuerpo por parte de distintos organismos como corales, almejas, ostras, peces, mamíferos y algunas plantas y animales microscópicos.



c) CAUSAS QUE PROVOCAN EL AUMENTO DE TEMPERATURAS.

Las principales causas por las cuales se produce un aumento en las temperaturas en el planeta:

- ✓ La quema de combustibles fósiles (tanto para la producción de energía como para el transporte y la industria), en donde no hay control para su uso, es tan triste ver como quemamos estos combustibles, sin conciencia, que crueles somos, agotamos sin pensar que sucederá en ese acto que hacemos día con día. Quizás encaja la siguiente analogía: "La tierra es como el cuerpo de un drogadicto, en donde este individuo introduce en su cuerpo cualquier cantidad de sustancias tóxicas para sentirse bien, sus ganancias son enormes, vive la vida con tal tranquilidad al obtener lo que quiere, pero que está sucediendo en su organismo, ¿Seguirá funcionando bien?, ¿Qué daño tenemos en él?, por supuesto que no es así, este organismo drogado, empeora día con día, el sistema motor, los reflejos se debilitan, ya no hay control en nada, y el organismo deja de funcionar como debería y viene el colapso, la persona

muere". Es la misma analogía con nuestro planeta si no le damos un alto a nuestras acciones.

- ✓ La deforestación, que impide que los vegetales fijen grandes cantidades de CO₂, anteriormente en la tierra la cantidad de CO₂ que se enviaba a la atmósfera se retenía en las plantas y el ciclo continuaba pero ahora debido al exceso y a la tala e incendio de los árboles ya no es posible esta enorme auto curación si le podemos llamar así.

d) GASES DE EFECTO INVERNADERO.

Descripción de los principales gases que provocan el efecto invernadero:

CO₂: Su importancia no radica en que sea el gas más peligroso en toxicidad y permanencia en la atmósfera, sino en la concentración a la que se encuentra, 1000 veces superior a la de cualquier otro producto de origen industrial. Las emisiones de este gas representan el 50% del efecto invernadero producido por la actividad humana.

El CO₂ se genera en los procesos de combustión de hidrocarburos de automóviles y calefacciones industriales, antracita y hulla de las centrales térmicas, turba de las chimeneas, incendios forestales y, en menor proporción, del gas.

El origen de la producción humana de CO₂ varía sensiblemente según la zona. En los EEUU la mayor parte de este gas es originado por el transporte; en China, por la industria y las centrales térmicas; en los países de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), a las centrales de petróleo; y en los países pobres, con menor contaminación, a la quema de leña para hacer fuego (calor, cocina).

El metano, generado en actividades agropecuarias, es responsable del 16% del efecto invernadero. Este gas se obtiene principalmente, de la descomposición de la materia orgánica, en ambientes pobres en oxígeno, y sus principales productores son el ciclo digestivo del ganado, ciertos cultivos (por ejemplo, los arrozales), los vertederos y, en menor proporción, los incendios forestales, la actividad de las termitas y otros insectos.

La producción de metano se estima en 500 millones de toneladas métricas anuales, de las cuales, 345 millones (el 69%) son producto de la actividad humana.

El óxido nitroso (N₂O) representa el 6% del efecto invernadero. Proviene principalmente: de las chimeneas de las centrales energéticas que utilizan carbón, de los tubos de escape de los automóviles, y de la acción de los fertilizantes

nitrogenados que se utilizan en agricultura. El óxido nitroso también se libera por la degradación de fertilizantes nitrogenados y estiércol del ganado.

Aunque su concentración en la atmósfera es escasa, una molécula de N_2O tiene un poder de calentamiento global 230 veces superior a la del CO_2 , con un tiempo de permanencia en la atmósfera de 150 años.

La producción de cloro-fluoro-carbonos (CFCs) contribuye con aproximadamente el 14% del efecto invernadero.

Son gases no naturales de origen puramente industrial con alta toxicidad. Son sustancias químicas sintéticas, formadas por cloro, flúor y carbono.

Los CFC también destruyen la capa de ozono en la atmósfera, y hacen que una mayor proporción de rayos ultravioletas llegue a la superficie de la Tierra.

Los sustitutos del CFC, los hidrofluorocarbonos (HFC) y los hidroclorocarbonos (HCFC), son menos nocivos para el ozono, pero contribuyen de la misma manera al efecto invernadero. Así pues, sólo pueden ser considerados soluciones transitorias.

Ozono troposférico. Aunque el ozono en la estratosfera forma una capa protectora que nos protege de los rayos ultravioletas que provienen del sol, su presencia en la baja atmósfera, o troposfera, contribuye al efecto invernadero. Cada molécula es 2,000 veces más efectiva al atrapar calor que una molécula de CO_2 . Se genera por la reacción de la luz solar con contaminantes comunes, como:

- ✓ El monóxido de carbono.
- ✓ Los óxidos nitrosos.
- ✓ Los hidrocarburos.

En los trópicos, su tiempo de permanencia en la troposfera varía de horas a días.

El hexafluoruro de azufre (SF_6) y los Perfluorocarbonos (PFC) también están incluidos en el Protocolo de Kioto porque, aunque su producción es escasa, son muy tóxicos y de larga permanencia.

2.1. IMPORTANCIA Y APORTACIÓN DE LAS ASOCIACIONES Y CONVENCIONES AMBIENTALES.

Sus atribuciones comprenden:

- a) Evaluar la información científica y socioeconómica disponible sobre el cambio climático y su impacto, así como las opciones para mitigar el cambio climático y la adaptación al mismo.
- b) Proporcionar, previa solicitud, asesoramiento científico, técnico y socioeconómico a la Conferencia de las Partes (CP) en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC).

2.2. CONVENCIÓN MARCO DE NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO (CMNUCC).

El aumento de la evidencia científica sobre la interferencia humana en el sistema climático global, sumado a la creciente preocupación pública acerca del ambiente, impulsó al cambio climático a un lugar más destacado de la agenda política a mediados de los años 80'. En 1988, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) establecieron el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) para proveer a tomadores de decisiones políticas con información científica apropiada. Al IPCC, conformado por cientos de científicos y expertos líderes en la temática del calentamiento global, se le encargó evaluar el estado del conocimiento científico relacionado con el cambio climático, analizando sus potenciales impactos ambientales y socioeconómicos y asesorar en la formulación de políticas realistas.

Dos años más tarde, en 1990, el IPCC publicó un reporte en el que concluyó que la creciente acumulación de gases de Efecto Invernadero en la atmósfera, producto de las actividades humanas, "intensificarían el efecto invernadero, resultando en promedio en un calentamiento adicional de la superficie de la Tierra" para el próximo siglo, a menos que se adopten medidas para limitar las emisiones. El reporte confirmó que el cambio climático era una amenaza e hizo un llamado a establecer un acuerdo internacional para enfrentar este problema. Más tarde en ese mismo año, la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima hizo el mismo llamado. La Asamblea General de las Naciones Unidas respondió con el lanzamiento formal de las negociaciones para una convención marco sobre cambio climático, estableciendo un

"Comité de Negociación Intergubernamental" para desarrollar el acuerdo. Las negociaciones para formular un convenio internacional para la protección del clima global empezaron en 1991 y resultaron, en Mayo de 1992, en el establecimiento de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

2.3. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM).

La OMM tiene su antecedente más remoto en la creación de la Organización Meteorológica Internacional (Viena, 1873). Durante la XII Conferencia de Directores de esta organización, reunida en Washington en 1947, se adoptó el Convenio Meteorológico Mundial, que creó la Organización Meteorológica Mundial. Aunque el Convenio entró en vigor en 1950, la OMM inició de forma efectiva sus actividades en 1951, y ese mismo año pasó a convertirse en organismo especializado de las Naciones Unidas.

Desde entonces, la OMM es la encargada de liderar los asuntos relacionados con el estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos. Facilita la creación de redes de observación meteorológica e hidrológica; fomenta el mantenimiento de sistemas de intercambio rápido de información, normalización y publicación uniforme de estadísticas; e impulsa actividades en materia de hidrología operativa y la investigación y enseñanza de la meteorología. Actualmente, la OMM tiene su sede en Ginebra.

2.4. SURGIMIENTO DE MECANISMOS DE DESARROLLO LIMPIO (MDL).

Es un mecanismo cooperativo establecido bajo el Protocolo de Kioto, el cual tiene el potencial de ayudar a los países en desarrollo a alcanzar un desarrollo sostenible mediante la promoción de inversiones ambientalmente amigables por parte de gobiernos o empresas de los países industrializados. El MDL, contenido en el Artículo 12 del Protocolo de Kioto, permite a los gobiernos o entidades privadas de países industrializados implementar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo, y recibir créditos en la forma de "reducciones certificadas de las emisiones", o (RCEs), las cuáles pueden ser contabilizadas dentro de sus objetivos nacionales de reducción. El MDL procura la promoción del desarrollo sostenible de los países en desarrollo, y a la vez permite a los países desarrollados contribuir con el objetivo de reducir las concentraciones atmosféricas de los gases de Efecto Invernadero.

2.4.1 EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL) Y LOS MECANISMOS COOPERATIVOS.

El Protocolo establece tres mecanismos cooperativos diseñados para ayudar a los países industrializados (Partes Anexo I) a reducir los costos de alcanzar sus metas de emisiones, obteniendo la reducción de emisiones en otros países, a un menor costo que las acciones domésticas.

- *El Comercio Internacional de Emisiones (CIE)* permite a los países transferir parte de sus "derechos de emisiones" (unidades de cantidad atribuida).
- *La Implementación Conjunta (IC)* permite a los países reclamar crédito por las reducciones de emisiones que se generen de la inversión en otros países industrializados, lo cual resulta en una transferencia de equivalentes "unidades de reducción de emisiones" entre los países.
- *El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)* permite proyectos de reducción de emisiones que propicien un desarrollo sostenible en los países en desarrollo y generen "reducciones certificadas de emisiones" para el uso del inversionista.

Los mecanismos dan a los países y a las compañías del sector privándola oportunidad de reducir emisiones en cualquier lugar del mundo, dónde sea que el costo sea menor, pudiendo contar con estas reducciones para cumplir sus propios objetivos.

2.5. PANORAMA GLOBAL DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) Y SUS APLICACIONES.

Desde hace varias décadas las principales potencias mundiales se han venido preocupando por fomentar el desarrollo sostenible de la humanidad dentro de los lineamientos y tratados internacionales que procuran el bienestar del medio ambiente; para ello han debido plantear e implementar planes que permitan la reducción eficaz de agentes contaminantes tales como los gases invernadero, entre los cuales se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), el cual, se estima, ha incrementado su concentración en la atmosfera principalmente debido a la quema de combustibles fósiles y en un menor porcentaje debido a cambios en el uso de la tierra.

Esta concentración de CO₂ en la atmosfera ha influido indiscutiblemente en el tema del calentamiento global, pero aun así no se puede negar la utilidad que tiene este compuesto dentro de diversas actividades a nivel industrial, y en la misma naturaleza en procesos en la biosfera terrestre, el océano y la litosfera.

Actualmente el CO₂ está inmerso dentro de nuestras vidas, encontramos varias de las aplicaciones a nivel industrial que nos está ofreciendo este Dióxido de carbono, y aparentemente ofrece un campo de estudio muy variado. Ahora lo tenemos formando parte de nuestras vidas, dentro de estas aplicaciones tenemos las siguientes:

2.5.1 AGRICULTURA.

Por su papel en el crecimiento de las plantas, a veces se utiliza como abono.

Protección contra incendios.

En forma de gas o como sólido no conduce la electricidad y puede emplearse contra fuegos de equipos eléctricos en tensión. A su vez no deja residuos.

2.5.2 USOS INDUSTRIALES.

En máquinas frigoríficas o congelado como hielo seco, en la obtención de la cafeína y en el proceso de descafeinar el café, en determinados pigmentos, en el lavado de pulpa de papel y en el desencalado del cuero.

2.5.3 QUÍMICOS.

El Dióxido de carbono es utilizado en química para el control de la temperatura en reactores. CO₂ También se utiliza en neutralización de efluentes alcalinos.

El Dióxido de Carbono se utiliza en condiciones supercríticas para purificaciones o para operaciones de teñido de polímeros, fibras animales o vegetales.

2.5.4 FARMACÉUTICA.

El Dióxido de carbono es utilizado en inertización, síntesis química, extracción con fluidos supercríticos, neutralización (pH) de aguas residuales o de proceso y transporte a baja temperatura (-78°C o -108°F).

2.5.5 ALIMENTOS Y BEBIDAS.

El CO₂ es utilizado en el sector alimenticio en uno de sus principales dominios:

- ✓ La carbonatación de bebidas gaseosas, como las sodas, el agua mineral o la cerveza.
- ✓ En el acondicionamiento de productos alimenticios, sus propiedades de inertización y bacteriológicas se combinan bien con las del nitrógeno y aumenta la duración de los alimentos.

- ✓ Como fluido criogénico en las operaciones de enfriamiento o de congelación o como nieve carbónica para la regulación de temperaturas durante la distribución de productos alimenticios.
- ✓ La cafeína se remueve del café por el CO₂ supercrítico.

2.5.6 MEDICINAL.

El CO₂ produce una atmósfera similar a las condiciones fisiológicas durante la manipulación de órganos artificiales.

El dióxido de carbono es utilizado mezclado con el aire o el oxígeno como estimulante para mejorar la aireación del sistema respiratorio. Sirve además, en la dilatación quirúrgica para la realización de laparoscopia abdominal.

2.5.7 INDUSTRIA DE LOS METALES.

El Dióxido de Carbono se utiliza normalmente para la protección del medioambiente: Se emplea para eliminar los humos rojos durante las cargas de chatarra y carbón, para la reducción de la nitruración durante la colada en los Hornos Eléctricos de Arco, y para remover la mezcla a nivel del suelo. En la metalurgia de no féreos, el dióxido de carbono sirve para suprimir los humos durante la transferencia de mata (producción de Cu/Ni) o lingotes de metales preciosos (producción de Zn/Pb). Pueden utilizarse pequeñas cantidades de CO₂ en los procesos de reciclado de las aguas provenientes de drenado de minas. Los láseres de CO₂ se alimentan con dióxido de carbono de pureza especial.

2.5.8 LABORATORIOS Y ANÁLISIS.

El CO₂ Supercrítico es la fase móvil en aplicaciones cromatografías y de extracción.

2.5.9 PULPA Y PAPEL.

El dióxido de carbono permite regular finamente el pH en la fabricación de pastas recicladas o químicas después de un blanqueamiento alcalino. El CO₂ puede usarse en la neutralización de "tall oíl" y para la mejora del funcionamiento de las máquinas de papel.

2.5.10 ELECTRÓNICA.

El dióxido de carbono es empleado generalmente en el tratamiento de efluentes líquidos o durante el enfriamiento de los componentes en los ensayos climáticos de componentes electrónicos.

El dióxido de carbono puede servir para aumentar la conductividad del agua ultra pura o para limpiar los abrasivos de piezas como nieve carbónica y en el propio proceso de limpieza de las resinas fotosensibles al CO₂ supercrítico, a fin de evitar la utilización de solventes orgánicos.

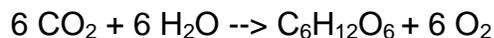
2.5.11 AMBIENTAL.

La inyección de dióxido de carbono permite manejar el pH de los efluentes líquidos. El CO₂ es una excelente alternativa para el control del pH del ácido sulfúrico.

El dióxido de carbono es uno de los gases más abundantes en la atmósfera. El dióxido de carbono juega un papel importante en los procesos vitales de plantas y animales, tales como fotosíntesis y respiración. A continuación explicaremos brevemente estos procesos.

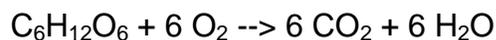
Las plantas verdes transforman el dióxido de carbono y el agua en compuestos alimentarios, tales como glucosa y oxígeno. Este proceso se denomina fotosíntesis.

La reacción de la fotosíntesis es como sigue:



Las plantas y los animales, a su vez, transforman los componentes alimentarios combinándolos con oxígeno para obtener energía para el crecimiento y otras funciones vitales. Este es el proceso de respiración, el inverso de la fotosíntesis.

La reacción de la respiración es como sigue:



La fotosíntesis y la respiración juegan un papel muy importante en el ciclo del carbón y están en equilibrio entre sí.

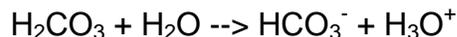
La fotosíntesis domina durante la época más templada del año y la respiración domina durante la época más fría del año. Sin embargo, ambos procesos tienen lugar a lo largo de todo el año. En conjunto, entonces, el dióxido de carbono en la atmósfera disminuye durante la época de crecimiento y aumenta durante el resto del año.

Debido a que las estaciones en los hemisferios norte y sur son opuestas, el dióxido de carbono en la atmósfera aumenta en el norte mientras que disminuye en el sur, y viceversa. El ciclo está más claramente presente en el hemisferio norte; porque tiene relativamente más masa y vegetación terrestre. Los océanos predominan en el hemisferio sur.

El dióxido de carbono puede cambiar el pH del agua. Así es como funciona: El dióxido de carbono se disuelve ligeramente en agua para formar un ácido débil llamado ácido carbónico, H_2CO_3 , de acuerdo con la siguiente reacción:



Después de esto, el ácido carbónico reacciona ligeramente y reversiblemente en el agua para formar un catión hidronio, H_3O^+ , y el ión bicarbonato, (HCO_3^-), de acuerdo con la siguiente reacción:



Este comportamiento químico explica por qué el agua, que normalmente tiene un pH neutro de 7, tiene un pH ácido de aproximadamente 5.5 cuando ha sido expuesta al aire.

2.5.12 INDUSTRIA PETROLERA.

La industria del petróleo viene utilizando desde los años 30 del siglo pasado la inyección de CO_2 como forma de favorecer la recuperación del petróleo residual (normalmente más del 60% del volumen total del yacimiento), que no fluye espontáneamente por diferencia de presión una vez que la presión interior del yacimiento se acerca a la presión atmosférica tras la perforación.

Esta técnica, conocida como Enhanced Oil Recovery (EOR), no tiene en principio por objetivo primordial el almacenamiento de CO_2 , sino la disminución de la viscosidad del petróleo para facilitar su migración y recuperación por bombeo. Este método de explotación de campos de petróleo se está poniendo en práctica en muchos países, especialmente en EEUU, que consume 6,900 toneladas diarias de CO_2 .

En la actualidad, la tasa aproximada de utilización de CO₂ es de 120 Mt de CO₂ al año (30 Mt de C al año) en todo el mundo, con exclusión de su uso con fines de recuperación mejorada de petróleo.

De la misma forma, el CO₂ se utiliza para proyectos de recuperación de gas o Enhanced Gas Recovery (EGR), aunque la experiencia en este tipo de yacimientos es menor. Sin embargo, en Europa constituye un objetivo más importante en cuanto a almacenamiento potencial de CO₂ (6 Gt) según el proyecto GESTCO, y 50 -1200 Gt en el mundo, con 240 Gt de media). Hasta ahora, el objetivo del EOR era inyectar la mínima cantidad de CO₂ para conseguir un aumento máximo en la producción de petróleo. Sin embargo, actualmente se pretende inyectar el máximo de CO₂ posible, sin disminuir la producción de petróleo, incluso aumentándola.

El Proyecto Weyburn (Canadá) está desarrollando una serie de trabajos enfocados a optimizar ambos efectos. Generalmente se recicla parte del CO₂ inyectado y se alterna con inyección de agua, Water Alternate Gas (WAG), de manera que el rendimiento del almacenamiento de CO₂ disminuye.

Los trabajos del proyecto Geological Sequestration of Carbón Dioxide (GEO-SEQ) indican que con la inyección de CO₂ puro puede conseguirse una producción similar al WAG, pero con una cantidad de CO₂ almacenado 2,5 veces superior. Estudios recientes (GEO-SEQ) indican que en algunos depósitos de gas de California la producción puede mejorarse con prácticas EGR. En este sentido hay que diferenciar dos tipos de yacimientos de gas natural: los que una vez perforados se vacían de gas por la propia presión existente en el almacén y los que son inundados por el agua de las formaciones circundantes al depósito.

En el primer caso, la presión disminuye conforme va saliendo el CH₄, y puede recuperarse entre el 75 % y el 90 % del gas contenido en ellos. En el segundo, la presión no disminuye tanto y la recuperación suele oscilar entre el 50 % y el 75 %, ya que el agua acaba alcanzando los sondeos de extracción y los inutiliza.

Los procesos de EGR son más interesantes en este último tipo de yacimiento, y es preferible llevarlos a cabo en almacenes en proceso de agotamiento, pero no completamente agotados, ya que así la presión se mantiene con el CO₂ inyectado y se aprovecha la infraestructura existente, todavía en buen funcionamiento. Las propiedades del CO₂ supercrítico parecen favorecer los mecanismos de EGR, ya que el CO₂ en dicho estado (a profundidades mayores de 800 m) es más denso y viscoso que el CH₄, lo que tiende a disminuir la posibilidad de mezcla entre ambos compuestos durante el desplazamiento.

Un experimento de campo reciente fue la inyección, durante 2 meses, de 2,100 toneladas de CO₂ en una capa de arenas de 12 m de espesor, que constituye el yacimiento de petróleo agotado de West Pearl Queen (EEUU), y la extracción de parte del CO₂ a los 6 meses. Se observó una acumulación de CO₂ en torno al punto de inyección, que permaneció estacionaria, sin alejarse. Las muestras extraídas indican que se produjo reacción entre el CO₂ y el petróleo remanente, disolviéndolo.

En los campos de gas sucede algo semejante. En ambos casos, a medida que disminuye la presión del hidrocarburo, en la roca almacén se crea un importante volumen de poros rellenos de gas a baja presión que, por otra parte, no suele ser colmatado por el flujo de agua y que puede ser utilizado para almacenar CO₂. La limitación más inmediata e importante para la utilización de los campos exhaustos de petróleo o gas para almacenar CO₂ es la posible existencia de pozos sin sellar, que pueden actuar como vías de escape, o la creación de nuevas vías por la reactividad química del CO₂ sobre la roca almacén o por la microfisuración inducida por la propia inyección del CO₂. En contrapartida, cualquier yacimiento de hidrocarburos ha demostrado su capacidad de retener tanto fluidos como gases durante periodos de tiempo que se miden en millones de años. Más dudosa es esta situación en relación con las trampas “secas” de petróleo o gas, en las que la ausencia de hidrocarburo puede estar motivada por inexistencia de roca-madre productora o por las fugas desde la roca almacén, debidas a la ineficacia de las trampas.

Desde Levorsen (1956), se denomina trampa a toda anomalía geológica de origen tectónico (pliegue anticlinal, flexión o falla), estratigráfico (acuñamiento, arrecife, etc.) o litológico (cambio de facies con pérdida de permeabilidad) que constituye una barrera a techo para el movimiento del gas y/o el petróleo. Una trampa incluye ambas formaciones, la que actúa como repositorio o almacén y la que constituye el sello impermeable. El contacto entre ambas formaciones es cóncavo hacia abajo.

Se distinguen distintos tipos de trampa:

- Trampas estructurales: definidas por elementos tectónicos, pliegues, fallas y sus diversas combinaciones.
- Trampas estratigráficas: definidas por cambios litológicos, como por ejemplo pérdida de permeabilidad por cambios sedimentarios que pueden constituir acuñamientos, lentejones o formaciones de arrecifes, o cambios paleo geográficos, como acuñamientos erosivos o paleocanales.
- Trampas mixtas: en las que intervienen, en partes sensiblemente iguales, parámetros estructurales y variaciones estratigráficas o litológicas. En definitiva, la

combinación de la inyección de CO₂ junto con la recuperación de petróleo o gas representa una buena opción de almacenamiento de una buena parte de la producción y emisión a la atmósfera del CO₂ no deseable por su efecto invernadero.

La bondad de esta opción estriba en que al coste derivado de almacenar CO₂ hay que restarle el beneficio económico que conlleva la recuperación del petróleo y/o gas remanentes en algunos yacimientos considerados agotados o próximos a su agotamiento. La función del CO₂ inyectado sería el de desplazar el petróleo y/o gas remanente, mecanismo por el que se aumenta la eficiencia de algunos campos petrolíferos, debido a la solubilidad del CO₂ en el hidrocarburo, lo que disminuye su viscosidad y facilita su paso a través de la porosidad conectada del yacimiento. Se estima que puede aumentar la eficiencia de la explotación entre un 15 y un 25 %.

Por otra parte, en términos de seguridad, los yacimientos de hidrocarburos o gas (agotados o en explotación) situados en trampas estratigráficas y/o estructurales han demostrado, por sí mismos, poseer unas buenas características de almacenamiento y sellado, por lo que su eficacia en cuanto a la retención no está cuestionada. Su estudio ha de ser usado para comprender los mecanismos de atrapamiento relacionados con un posible almacenamiento de CO₂.

En algunos de los proyectos en curso se han establecido las características más relevantes de los yacimientos de cara a la futura selección de áreas con opción a albergar un posible almacenamiento de CO₂.

Hay que tener en cuenta que, en condiciones atmosféricas, el CO₂ es un gas termodinámicamente estable más denso que el aire. Su estado físico varía con la presión y la temperatura. Por debajo de su "punto crítico" (31.1 °C y 7.38 MPa =72.8 atm), el CO₂ es un gas o un líquido dependiendo de la temperatura y de la presión. A temperaturas y presiones superiores a las del "punto crítico", el CO₂ se encuentra en estado supercrítico, con una densidad que aumenta hasta los 1100 kg/m₃ a grandes profundidades (Stewart y Bachu, 2001) Así, el CO₂ podrá ser almacenado en las formaciones geológicas como gas, como líquido o en estado supercrítico, dependiendo de las condiciones de temperatura y presión "in situ" al nivel del almacenamiento.

Teniendo en cuenta las presiones y temperaturas a las que el CO₂ se encuentra en estado líquido o gas, y dado que la inyección del CO₂ se realizaría en estado supercrítico, se pueden rechazar muchas áreas dentro de un mismo yacimiento por presentar temperaturas y/o presiones inferiores a las requeridas. Los estudios realizados a este respecto asumen que el CO₂ puede almacenarse en estado supercrítico a una profundidad de ≈ 800 m (Van Der Meer, 1993; Van Der Meer et al,

2005; Holloway y Savage, 1993). Sin embargo la temperatura y presión de un yacimiento de petróleo o gas puede ser muy variable, en función de la profundidad y de su situación dentro de la cuenca sedimentaria, por lo que la presión variará también en función del alcance de las operaciones realizadas y el nivel de explotación del propio yacimiento.

En definitiva, las condiciones idóneas para almacenar CO₂ en estado supercrítico se pueden extender desde profundidades relativamente someras a grandes profundidades, por lo que un criterio adicional de selección de áreas sería que la presión del yacimiento al comienzo de la inyección debería ser, al menos, de 1.38 Mpa (200 psi) por encima de la presión mínima de miscibilidad (MMP), al objeto de conseguir la miscibilidad entre el CO₂ y el petróleo. Esto significa que la relación entre la presión del reservorio y la presión mínima de miscibilidad (P/MMP) debe ser >1. Incluso en estas condiciones, pueden existir muchas circunstancias geológicas (en referencia a yacimientos de gas y/o petróleo) cuyas incertidumbres asociadas se recogen en la Tabla.

2.6. CIRCUNSTANCIAS GEOLÓGICAS E INCERTIDUMBRES ASOCIADAS AL ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN YACIMIENTOS DE GAS Y PETRÓLEO.

2.6.1 PROYECTOS EOR Y EGR EN CURSO.

La información aportada por proyectos ya en desarrollo, así como la experiencia adquirida en las operaciones de inyección de CO₂ con recuperación de petróleo o gas indican que es posible almacenar CO₂ en formaciones geológicas, ayudando así a la política de mitigación de emisiones de gases con efecto invernadero, emprendida por determinados países.

Estos proyectos pueden considerarse por su desarrollo como análogos industriales de la secuencia de acontecimientos y procesos que se producirán en un hipotético almacenamiento de CO₂, aunque manteniendo una clara divisoria entre la información generada por las acumulaciones naturales (análogos naturales) y estos industriales.

Además, la inyección de CO₂ utiliza tecnología desarrollada para la industria del gas y petróleo y podrá adaptarse a las necesidades de un futuro almacenamiento geológico de CO₂.

Dado que el interés por el almacenamiento de CO₂ se ha incrementado actualmente por el beneficio económico que supone la recuperación de gas y/o petróleo residual, se están poniendo en práctica numerosos proyectos, entre los que destacan los siguientes:

- En el Mar del Norte, en el marco del proyecto Sleipner, se está inyectando desde 1996 y actualmente se inyectan aproximadamente casi 1 Mt de CO₂ al año.

Además se está considerando la posibilidad de implantar un proyecto del tipo CO₂ – EOR, para asegurar un mayor rendimiento de los campos de petróleo de dicha zona.

- En Argelia, en el campo petrolífero de In – Salah, se inyecta CO₂ en un yacimiento de gas natural.

- En EEUU se inyectan anualmente 30 Mt de CO₂ en diversos campos petrolíferos localizados sobre todo al oeste de Texas, en aproximadamente 73 proyectos de inyección que comenzaron en los años 70. El proyecto SACROC fue el primero del tipo CO₂-EOR realizado a escala comercial en el mundo y utilizó CO₂ antropogénico para la inyección en el periodo de tiempo comprendido entre los años 1972 y 1995.

- En Canadá, se lleva a cabo un proyecto del tipo CO₂-EOR en el que la compañía ENCANA inyecta actualmente de 1 a 2 Mt de CO₂ al año en el campo petrolífero de Weyburn, al sur de Saskatchewan, donde además se está realizando la monitorización para el seguimiento del comportamiento del CO₂ almacenado. En el proyecto Weyburn se espera inyectar un total de 23 Mt de CO₂, extendiendo así la vida del yacimiento unos 25 años más.

- Existen además otros proyectos EOR funcionando y repartidos por el mundo.

Por ejemplo, en Alemania, se comienza a inyectar CO₂ a escala experimental en el campo de gas agotado K12-B (Van Der Meer et al, 2005).

- La compañía ARAMCO SAUDI, la mayor productora y exportadora de crudo del mundo, está evaluando la posibilidad de implantar proyectos CO₂-EOR en alguno de sus yacimientos de Arabia Saudí.

- En el NE de China, en el campo petrolífero del Liaohe, se están llevando a cabo también trabajos de inyección de CO₂ para recuperar el petróleo remanente en algunos pozos.

En suma, los proyectos comerciales tipo EOR están en alza por el beneficio económico que suponen. El hecho de constituir yacimientos de hidrocarburos implica una serie de ventajas, ya que, por una parte, son almacenes que han demostrado

sus características de estanqueidad y estabilidad a largo plazo, y por otra, se trata de zonas muy estudiadas, con características muy definidas por la investigación que sobre ellas se ha llevado de forma previa al inicio de la explotación, por ser yacimientos de alta rentabilidad.

Como ejemplos de proyectos tipo EGR y EOR, a continuación se describen brevemente las características de las investigaciones y operaciones realizadas en el yacimiento de gas de In-Salah en Argelia, las correspondientes al proyecto Weyburn, desarrollado en la cuenca de Williston, entre Canadá y los EEUU, y las operaciones realizadas en el Mar del Norte, en las plataforma Sleipner, en el marco del proyecto SACS.

2.6.2 EL PROYECTO IN-SALAH.

El campo de gas de In-Salah está localizado en Argelia, en el Sahara central, y es el primer proyecto a gran escala de almacenamiento de CO₂ en un yacimiento de gas. Argelia está dividida en dos unidades estructurales mayores separadas por la falla sur del Atlas. La zona norte está principalmente afectada por la tectónica alpina, mientras que la zona sur corresponde a la plataforma sahariana, relativamente estable desde el punto de vista de su actividad tectónica.

La plataforma sahariana está constituida por un basamento Precámbrico cubierto por depósitos fanerozoicos de carácter transgresivo. Los límites de las cuencas sedimentarias están delimitados por eventos tectónicos que reflejan, en parte, los procesos geodinámicos globales responsables de la división geológica de Argelia en dos dominios. Se diferencian cuatro provincias según el grado de madurez de los hidrocarburos:

- El Sahara oriental: bien conocido por sus yacimientos de gas y petróleo y su gran potencial en hidrocarburos.
- El Sahara central: con diferentes yacimientos de gas de tamaño muy variable, en donde se encuentra la zona de In-Salah.
- El Sahara occidental: con posibilidades de contener yacimientos de gas pero prácticamente inexplorado.
- El norte de Argelia: cuyo potencial en yacimientos de hidrocarburos está parcialmente conocido por su complejidad geológica.

La plataforma sahariana está localizada al sur de la zona alpina y es una parte del cratón africano. Comprende un basamento precámbrico y una potente serie supra

yacente y discordante, integrada por sedimentos estructurados durante el paleozoico en diferentes cuencas que, de oeste a este, son:

- Las cuencas de Tindouf y Reggane, localizadas en el N y NE del escudo de Reguibat, tienen una potencia de sedimentos de ≈ 8000 m en la primera y 6500 m en la segunda.

Corresponde a un área poco explorada, pero sus rocas paleozoicas constituyen un buen objetivo para la prospección.

- La cuenca de Bechar limita al norte con el Alto Atlas y al sur y oeste con la cadena de Ougarta. Presenta una potencia de sedimentos de ≈ 8000 m. Los yacimientos están localizados dentro de las rocas clásticas del Paleozoico inferior y en las formaciones de corralinas del Carbonífero.

- La cuenca de Ahnet-Timimoun está bordeada, por el oeste, por la cadena de Ougarta, por el sur, por el escudo Touareg y, por el este, por las montañas de Idjerane-Mزاب. La sucesión sedimentaria presenta ≈ 4000 m de potencia. En el sur existen yacimientos de gas en materiales Ordovícicos y Devónicos, y en el norte se ha descubierto petróleo en todas las formaciones paleozoicas de la zona de Sbaa.

- Las cuencas de Mouydir y Aguemour-Oued Mya están rodeadas, por el oeste, por la cadena de Idjerane-Mزاب y, por el este, por la dorsal Amguid-El Biod. En el sur del área de Mouydir las secuencias sedimentarias paleozoicas se encuentran aflorantes, mientras que en la cuenca de Aguemour-Oued Mya la zona norte está ocupada por sedimentos paleozoicos y mesozoicos de ≈ 5000 m de espesor.

- Sinclinal de Illizi-Ghadames está limitado, por el oeste, por la dorsal Amguid-El Biod y, por el este, por el levantamiento de Tihemboka. La cobertura sedimentaria supera los 6000 m de potencia, y los yacimientos de hidrocarburos se encuentran tanto en los sedimentos paleozoicos como en los del Triásico.

La inyección de CO₂ en In Salah se realiza en tres campos petrolíferos (Krechba, Reg y Teg) de los siete que se encuentran en exploración, en la cuenca de Ahnet-Timimoun. Las compañías Sonatrach, BP y Statoil operan conjuntamente en la inyección de CO₂, que se realiza por debajo de la capa de gas natural para su recuperación.

Además, la compañía Statoil está planificando la puesta en marcha de otro proyecto en el Mar de Barents, en el campo de gas de Snohvit, con el mismo objetivo, la recuperación de gas natural. La compañía Chevron, por su parte, está planificando la producción de gas natural en el campo de Gorgon al oeste de Australia (Oen, 2003)

El campo de gas de Krechba en In-Salah produce un gas natural que contiene más de un 10% de CO₂, el cual tiene que ser separado del gas natural para su exportación a Europa y cumplir así con las especificaciones requeridas.

La inyección de CO₂ comenzó en abril del 2004 y se estima que puede alcanzar las 17 Mt en el tiempo que dure la explotación del yacimiento. El proyecto de extracción e inyección consta de cuatro pozos de producción y tres de inyección. La inyección de CO₂ se realiza en la zona de contacto gas-agua y se espera que el CO₂ inyectado migre hacia las posiciones que ocupaba el gas antes de su extracción.

En síntesis, la zona experimental consta de una estructura anticlinal simple, que ha sido estudiada mediante sondeos y sísmica tridimensional, en la que existen fallas profundas que no afectan a la estructura superficial, por lo que el riesgo estructural de escape de CO₂ es mínimo. El techo de la formación almacén está formado por una fina alternancia de arcillas con más de 950 m de espesor.

Los procesos resultantes de la migración han sido cuantificados y existe un programa de monitorización que implica la aplicación de diferentes técnicas: trazadores de gas, ensayos de presión, tomografía, gravimetría, sísmica y monitorización geo mecánica.

2.6.3 EL PROYECTO WEYBURN.

El campo petrolífero de Weyburn está localizado en una cuenca sedimentaria de forma aproximadamente circular (cuenca de Williston) y desarrollada sobre el cratón de América del Norte y que se extiende desde el centro sur de Canadá hasta la parte centro norte de EEUU. Esta cuenca tiene un gran potencial para almacenar CO₂, ya que incluye yacimientos de petróleo activos y agotados, formaciones salinas profundas y capas de carbón.

La cuenca de Williston está considerada como tectónicamente estable (Fischer et al., 2005), en la que la sedimentación fue predominantemente siliciclástica durante el periodo Cámbrico – Ordovícico inferior, mientras que los carbonatos y evaporitas dominan desde el Ordovícico medio hasta el Misisipiense. Los sedimentos siliciclásticos son de nuevo dominantes desde el Pensilvaniense hasta el Holoceno.

La mayoría de los yacimientos de petróleo se sitúan en las formaciones carbonatadas existentes desde el Ordovícico al Misisipiense, en las que la porosidad y permeabilidad están controladas por los ambientes de depósito, los cuales son complejos y cambian rápidamente, tanto en la horizontal como en la vertical.

La sedimentación más temprana y la historia estructural de la cuenca son difíciles de describir porque los sedimentos precámbricos no afloran y sólo se cortan en unos pocos sondeos. El conocimiento actual está basado en las observaciones realizadas en áreas adyacentes y, fundamentalmente, en las interpretaciones de perfiles sísmicos.

En el basamento antiguo de la cuenca de Williston se han diferenciado tres provincias geológicas (Green et al., 1985), dos de ellas son de edad arcaica y representan cratones o protocontinentes que están separados por sedimentos oceánicos de edad proterozoica. Ambos cratones son aproximadamente de la misma edad, pero mientras el Cratón Superior está constituido por un cinturón de rocas verdes (greenstones) y granitos, el Cratón de Wyoming está formado por gneises, fundamentalmente. Los sedimentos oceánicos situados entre los dos cratones corresponden a materiales de acreción situados entre dos márgenes continentales activos.

El basamento está compartimentado en bloques delimitados por una serie de lineamientos NE-SW y NNW-SSE y definidos como zonas de debilidad estructural, las cuales han condicionado la formación de la cuenca que, a su vez, está relacionada con el hundimiento extensional en respuesta al zizallamiento siniestro entre los lineamientos de Weldon-Brockton y el de Wyoming (Gerhard et al., 1982 y 1987).

Otras características estructurales, como son los plegamientos y la fracturación están igualmente condicionadas por la subsidencia o movimientos esporádicos de lineamientos individuales, así como por los modelos de depósito de la cuenca.

La cuenca de Williston, que en su conjunto es una provincia productora de petróleo, fue descubierta en 1936 a lo largo del anticlinal Cedar Creek, en sedimentos bastante superficiales de edad cretácica. Las primeras extracciones de petróleo se hicieron en trampas estructurales controladas por estructuras mayores, y localizadas en la parte central de la cuenca. Sin embargo, actualmente existen un número importante de explotaciones relacionadas con trampas estratigráficas, con algún componente estructural de carácter menor.

La mayoría de la producción de gas de la cuenca de Williston está asociada con la producción de petróleo. En la planta de desgasificación de Beulah (Norte de Dakota), el CO₂ es deshidratado, comprimido y enviado a Weyburn para su inyección. Se calcula que la duración de la inyección será de unos 15 años, a razón de 3000 t/día. En concreto, el campo de Weyburn cubre un área de 180 km² con una cantidad original de petróleo de 222 Mm³ (1396 millones de barriles), y se espera que en un

periodo de 20-25 años se puedan almacenar en este yacimiento 20 Mt de CO₂ en las condiciones económicas y tecnológicas de recuperación de petróleo actuales. Las maniobras de inyección han sido diseñadas combinando sondeos verticales y horizontales para optimizar la eficacia de dicha operación. El yacimiento de petróleo se encuentra en una secuencia carbonatada muy fracturada de 20-27 m de espesor con un sello de anhidrita. En la zona norte, el yacimiento se estrecha debido a una discordancia regional. El sello basal es, igualmente, una capa de anhidrita, aunque menos continua y consistente que el sello suprayacente. Desde la primera inyección, realizada a finales del año 2000, se producen 1,600 m³/día de crudo (10,063 barriles), y actualmente la tasa de inyección de CO₂ es de 1,000 t/día y se supone que esta cantidad puede incrementarse con el avance del proyecto.

Al mismo tiempo se está realizando una campaña intensiva y extensiva de monitorización profunda y superficial, empleando sísmica de alta resolución con el fin de determinar la existencia de escapes potenciales de CO₂. La monitorización superficial incluye muestreo y análisis de agua potable, muestreo y análisis de gas en el suelo (Moberg et al., 2003). Hasta la fecha no se ha detectado indicio alguno de escape de CO₂ hacia la superficie ni cerca de ella (White et al., 2004; White, 2005; Strutt et al., 2003).

2.6.4 EL PROYECTO SACS - PLATAFORMA SLEIPNER (MAR DEL NORTE).

En el Mar del Norte, frente a las costas de Noruega, se está desarrollando un importante proyecto de almacenamiento de CO₂ en el subsuelo, bajo la dirección de la compañía petrolera Statoil.

En el campo de Sleipner, el gas natural está mezclado con un 9% de CO₂, que, después de separarse del CH₄, se inyecta en el acuífero salino profundo existente en la Formación Utsira.

La Formación Utsira comprende básicamente sedimentos depositados entre el Mioceno Medio y el Plioceno temprano y consiste principalmente en arena fina interrumpida por finos horizontes de arcilla. La arena de la formación, denominada *Utsira Sand*, se extiende más de 400 km en dirección norte-sur, llegando hasta unos 100 km en dirección este-oeste, cubriendo una superficie total de más de 26,000 km² (Torp y Gale, 2004; Chadwick et al., 2004).

Se trata de una formación muy porosa (35-40%) constituida fundamentalmente por arenas, que se encuentra situada a unos 1000 m por debajo del fondo marino. Los estudios petrográficos de muestras de sondeos, sugieren que la Formación Utsira consiste principalmente en una arena no cementada de grano fino, formada mayoritariamente por cuarzo y, en menor proporción, feldespatos y carbonatos (Chadwick et al., 2004), las arcillas son principalmente caoliníticas.

En esta formación arenosa se diferencian dos centros de depósito: uno situado al sur y otro al norte, respectivamente; separados por un adelgazamiento. La potencia mayor de la formación se localiza en el depocentro sur, con 300 m de espesor (Chadwick et al., 2004). El límite inferior de la Formación Utsira constituye un fuerte reflector a escala regional, que se interpreta como arenas con pequeñas intercalaciones de arcilla. El límite superior consiste en una secuencia de arenas y arcillas interestratificadas. Los registros de testificación gamma y de resistividad muestran también la Formación Utsira claramente separada de las unidades sub y suprayacente, mediante una fuerte caída de los valores de radiación gamma y de resistividad (Gregersen et al., 1997). Los picos internos registrados en los *logs* han sido interpretados como horizontes arcillosos de poco espesor que dividen la formación Utsira en varias sub-unidades.

La operación de inyección de CO₂ se inició en octubre de 1996, y desde entonces se han inyectado más de 2 Mt de CO₂.

La investigación en este proyecto está canalizada por el proyecto SACS (*Saline Aquifer CO₂ Storage Programme*), el cual está financiado conjuntamente por la UE y por la industria petrolera. En este proyecto se está evaluando la capacidad de almacenamiento, propiedades y rendimiento de la Formación Utsira, así como la seguridad en el almacenamiento mediante el seguimiento y modelización de la migración de CO₂ en el subsuelo, mediante campañas sísmicas en 4D, en el tiempo.

La cartografía regional de la Formación Utsira indica que ésta tiene una capacidad potencial de almacenamiento de aproximadamente $5,5 \times 10^{11} \text{ m}^3$, siendo la densidad del CO₂, en las condiciones de almacenamiento en las arenas de la Formación Utsira, de aproximadamente 725 kg m^{-3} , de forma que una tonelada de CO₂ ocuparía alrededor de $1,38 \text{ m}^3$ de espacio poroso en la roca.

En definitiva, la Formación Utsira es un ejemplo más, y la operación que se lleva a cabo en Sleipner es uno más de los escenarios posibles de almacenamiento de CO₂ en el subsuelo, en el que se está demostrando la viabilidad de eliminar el CO₂ y su eficacia a largo plazo. Pero el proyecto SACS es un proyecto de demostración e investigación y es el primero y único proyecto de secuestro de CO₂ en el mundo, que se está llevando a cabo con fines ambientales.

2.7. TRANSFORMACIÓN BIOMIMÉTICA DEL CO₂ (BIOCOMBUSTIBLES DE CUARTA GENERACIÓN).

El interés del ciudadano por el medio ambiente ha ido creciendo a lo largo del último cuarto del siglo XX a medida que nos hemos dado cuenta de que los recursos de la biosfera, ese gran ecosistema que nos acoge, son limitados, por lo que una buena gestión de estos recursos es imprescindible para garantizar la supervivencia del hombre en el planeta.

El aumento de la población genera un mayor consumo de energía, alimentos, y materiales, lo que conlleva un incremento de los residuos urbanos e industriales y por añadidura de la contaminación medioambiental. Algunas de las posibles soluciones para gestionar de forma sostenible el medio ambiente pasan por el desarrollo de nuevas tecnologías y en este sentido no cabe duda de que la Biotecnología tiene que desempeñar un papel fundamental. La Biotecnología proporciona herramientas muy poderosas para identificar, clasificar y preservar el patrimonio que representa la biodiversidad.

Con la ayuda de la genética hoy en día es posible obtener muchas ventajas de los organismos que viven en los ambientes extremos o de difícil acceso como por ejemplo en las profundidades marinas. Para la eliminación de los contaminantes, incluso de los más recalcitrantes, los seres vivos cuentan con una batería de posibilidades que les proporciona su diversidad metabólica. Algunos procesos químicos pueden ser remplazados por esta enorme capacidad transformadora de los organismos con lo que se generan procesos industriales mucho menos contaminantes.

Las energías renovables son imprescindibles para facilitar la sostenibilidad del medio ambiente. Pero sin lugar a dudas, la gran revolución de la Biotecnología surge con la aparición de las técnicas de la Ingeniería Genética que permiten sacar el máximo partido de los sistemas biológicos. En cualquier caso, dada la diversidad de culturas, medios y necesidades que conviven en el planeta, es lógico pensar que para lograr una buena gestión medioambiental se necesita alcanzar acuerdos a escala mundial y por ello los intentos para firmar convenios internacionales eficaces y duraderos constituyen una parte fundamental del éxito.

2.8. DISMINUIR LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) CON BIOTECNOLOGÍA.

La disminución de las emisiones de CO₂ pasa por cambiar la proporción entre los diversos métodos utilizados para generar la energía primaria consumida por la actividad humana. La mayor parte del CO₂ generado por la actividad humana (antropogénicas) se genera en los procesos de combustión de los llamados “combustibles fósiles” (petróleo, carbón y gas natural) para obtener energía. Con la tecnología actual, para reducir el empleo de estos combustibles fósiles solo cabe obtener más energía de origen nuclear y de fuentes renovables (hidráulica, eólica, solar, etc.). Sin embargo, en su estado actual de desarrollo las fuentes alternativas explotadas al máximo no pueden proporcionar más del 15% del consumo total de energía primaria. Un cambio tecnológico radical podría hacer eficiente la energía solar fotovoltaica, o la energía de fusión nuclear, pero eso no es predecible. El alcance de la Biotecnología en este campo es moderado.

Se ha apuntado la posibilidad de utilizar combustibles obtenidos a partir de plantas cultivadas, ya que de esta forma la cantidad de CO₂ producido al quemar estos combustibles sería aproximadamente igual a la cantidad de CO₂ tomado de la atmósfera para el crecimiento de estas plantas. Puede pensarse en plantas de crecimiento rápido que serían luego convertidas (o sus frutos) en biocombustibles por procedimientos biotecnológicos (bioetanol, por fermentación) o químicos (biodiesel, por transesterificación de aceites). Aunque es muy difícil que estos combustibles puedan competir todavía en igualdad de condiciones con el petróleo y sus derivados, poco a poco van utilizándose como una alternativa.

¿Cómo puede ayudar la Biotecnología en la limpieza de los derrames de petróleo?

El petróleo es uno de los contaminantes orgánicos más importantes, particularmente en el mar, al que se vierten varios millones de toneladas al año por diversas prácticas y accidentes. Hay varios factores que limitan la biodegradación del petróleo, entre los que destacan su composición química (tiene mucho carbono y bastante azufre, pero muy poco nitrógeno y fósforo en formas asimilables por los microorganismos), su gran insolubilidad en agua y la necesidad de que haya oxígeno disponible para que el proceso degradativo ocurra con rapidez.

Existen diversas estrategias que permiten explotar la capacidad microbiana de asimilar hidrocarburos para facilitar la limpieza de suelos o aguas contaminadas por petróleo. Dado que casi todos los ecosistemas contienen microorganismos capaces de degradar hidrocarburos, generalmente no hace falta añadir microorganismos nuevos o traídos de otro lugar (bioincremento), sino que basta con facilitar y estimular el crecimiento de aquellos que estén presentes en la zona contaminada (bioestimulación). Para ello es muy importante suministrar nutrientes que aporten nitrógeno y de fósforo, preferentemente en forma de mezclas oleofílicas (hidrofóbicas) que se dispersen bien en el petróleo. También es importante facilitar la presencia de suficiente oxígeno para facilitar la degradación aeróbica, más eficiente y rápida que la anaeróbica. La adición de microorganismos no suele dar buenos resultados, probablemente porque no suelen ser competitivos cuando se les inocula en otro ambiente diferente del que proceden. Hay que tener en cuenta que estos métodos, aunque eficaces, tienen sus limitaciones.

Una de ellas es la velocidad de degradación, que depende en gran medida de la temperatura y condiciones físico-químicas del lugar. Otro problema es que el petróleo contiene compuestos muy resistentes a la biodegradación. Finalmente, la degradación no será igual de eficiente en todos los lugares. En una playa, por

ejemplo, la mayor parte de los hidrocarburos que se encuentren al aire libre terminarán siendo metabolizados por diferentes microorganismos, pero el petróleo que se filtre a capas más profundas de la arena o que pase a los sedimentos marinos, persistirá durante mucho más tiempo.

El uso de biogás como combustible también supone una contribución despreciable al aumento de gases con efecto invernadero. Se dice que una tecnología es limpia (verde o ecológica) cuando su aplicación genera poca o ninguna contaminación ambiental. La reducción de la contaminación se puede conseguir de distintas maneras. A veces basta con optimizar la tecnología de producción para generar menos residuos, tratar de incluir productos menos tóxicos y más biodegradables en el proceso, o quizás mejorar el reciclado de los productos de desecho. Sin embargo, otras veces la opción de reducir la contaminación pasa por cambiar completamente la tecnología. En muchas ocasiones los procesos químicos, que por lo general son muy contaminantes, pueden sustituirse por procesos de biotransformación gracias a la Biotecnología.

La Biotecnología también puede contribuir al reciclado y eliminación de los productos de desecho. En términos generales, el uso de la Biotecnología en alguna de las etapas de la cadena de producción contribuye a que el proceso sea más respetuoso con el medio ambiente.

Este hecho predominante, da pie a: pensar en la posible solución al problema ambiental que estamos viviendo en este momento, y que quizás, sea una de las piezas para resolver el problema actual en cuanto al cambio climático.

Biotecnología, arma de doble filo si lo vemos de varias maneras pero por una parte a beneficio nuestro es posible su aplicabilidad, en buscar soluciones prosperas para todos, ya no es un tema de personas cultas, no, es un tema mundial que se debe de tomar en cuenta en este momento con tal urgencia y minuciosa veracidad en cuanto a encontrar las soluciones pertinentes.

CAPÍTULO III

TECNOLOGÍAS DE

CAPTURA DEL

DIÓXIDO DE

CARBONO (CO₂)

3. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

El cambio climático es un fenómeno de alcance mundial, cuyas consecuencias pueden acarrear impactos importantes en la humanidad y los ecosistemas en los que nos sustentamos. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), la región mediterránea puede ser una de las más afectadas del planeta, siendo los principales efectos el aumento de los extremos climáticos, la reducción de recursos hídricos, y el aumento del nivel del mar. En consecuencia, se prevén serias repercusiones para la Región, relacionadas con la migración de nichos ecológicos, la degradación del suelo, la pérdida de rendimientos de la agricultura y la pesca, el aumento de los conflictos por el agua.

El origen de esta problemática está relacionado con el aumento de la concentración atmosférica de los denominados gases de efecto invernadero (GEI), que presentan una tendencia exponencial creciente desde el inicio de:

- ✓ La industrialización.
- ✓ El aumento de la población.
- ✓ Y la consiguiente utilización masiva de combustibles fósiles.

En este sentido, la medida más importante que es preciso adoptar para prevenir el cambio climático es reducir la generación de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero).

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) es una de las técnicas que podrían utilizarse para reducir las emisiones de CO₂ provocadas por las actividades humanas.

Esta técnica podría aplicarse para aquellas emisiones que provengan de grandes centrales eléctricas o plantas industriales. El proceso consiste en tres etapas principales:

- ✓ Capturar el CO₂ en su fuente, separándolo de los otros gases que se generan en los procesos industriales.
- ✓ Transportar el CO₂ capturado a un lugar de almacenamiento apropiado (normalmente de forma comprimida).

- ✓ Almacenar el CO₂ fuera de la atmósfera durante un largo periodo de tiempo, por ejemplo en formaciones geológicas subterráneas, en las profundidades oceánicas o dentro de ciertos compuestos minerales.

Algunas de las tecnologías que se requieren para este proceso están más avanzadas que otras. A mediados del año 2005 ya se habían desarrollado tres proyectos comerciales en los que el CO₂ capturado se almacena en formaciones geológicas subterráneas, en el marco de proyectos de extracción o procesamiento de gas y petróleo.

La mayoría de escenarios relativos al consumo energético mundial, pronostican un aumento substancial de las emisiones de CO₂ a lo largo de este siglo de no tomarse medidas específicas para mitigar el cambio climático. También prevén que el abastecimiento de energía primaria seguirá siendo dominado por los combustibles fósiles, por lo menos hasta mediados de este siglo.

Por tanto, las técnicas para capturar y almacenar el CO₂ producido podrían, en combinación con otras opciones tecnológicas, desempeñar un papel importante en la lucha contra el cambio climático.

Sin embargo, ninguna opción tecnológica podrá, por si sola, permitir toda la reducción de las emisiones necesaria para estabilizar la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero a un nivel suficiente para prevenir interferencias peligrosas con el sistema climático.

Existen otras opciones tecnológicas para estabilizar la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero que consisten en:

- ✓ Reducir la demanda energética mediante el aumento de la eficiencia energética.
- ✓ Pasar a utilizar combustibles que requieran menos cantidades de carbono (por ejemplo, pasando del carbón al gas natural).
- ✓ Aumentar el uso de las fuentes de energías renovables y/o de la energía nuclear (cada una de las cuales emiten, a fin de cuentas, muy poco o nada de CO₂).
- ✓ Fomentar los sumideros naturales de carbono (como los bosques).
- ✓ Reducir gases de efecto invernadero aparte del CO₂ (como el metano).

La captura y almacenamiento de CO₂ sería una opción para los países desarrollados que necesitan reducir sus emisiones de CO₂ y que tienen importantes fuentes de CO₂ propicias a ser capturadas, acceso a los lugares de almacenamiento y experiencia con el tratamiento del gas y del petróleo. Sin embargo, existen muchas barreras para su expansión en dichos países. Por tanto, la creación de condiciones que faciliten la difusión de esta tecnología en los países en vías de desarrollo resultaría esencial para que la técnica de CAC se adopte a nivel mundial.

3.1. LAS FUENTES DE EMISIÓN POSIBLES A SER CAPTURADAS.

Varios factores determinan si la captura de dióxido de carbono es una opción viable para una determinada fuente de emisión:

- Su talla.
- Si es fija o móvil.
- Su proximidad con potenciales lugares de almacenamiento.
- Y el grado de concentración de sus emisiones de CO₂.

El CO₂ podría capturarse de fuentes de emisión fijas de gran envergadura, como las centrales eléctricas o las plantas industriales. De encontrarse cerca de lugares de almacenamiento potenciales, por ejemplo de formaciones geológicas adaptadas, estas infraestructuras podrían ser elegidas para la temprana implementación de la captura y almacenamiento de CO₂ (CAC).

A estas alturas, todavía no se consideran las fuentes de emisión, pequeñas o móviles, ya sea en hogares, comercios o medios de transporte, porque todavía no son adecuadas para la captura y almacenamiento.

En el año 2000, cerca del 60% de las emisiones de CO₂ derivadas del uso de los combustibles fósiles fueron producidas por fuentes de emisión fijas y de gran envergadura, como centrales eléctricas, plantas de extracción de petróleo y gas o industrias de tratamiento.

Cuatro grandes núcleos de emisiones procedentes de tales fuentes fijas son: la región central y el Este de los EE.UU., la región noroeste de Europa, la costa este de China y el subcontinente indio. Las instalaciones de transformación de biomasa a gran escala, por ejemplo para la producción de bio-etanol, también generan emisiones con un alto contenido de CO₂. Pese a que estas instalaciones son mucho más pequeñas y escasas, también podrían adecuarse a la captura y almacenamiento de CO₂.

Muchas fuentes fijas de emisión se encuentran justo encima, o a una distancia razonable (menos de 300 km), de potenciales áreas de almacenamiento geológico.

Si consideramos los diferentes escenarios de emisión, se prevé una captura potencial del 9-12% de las emisiones globales de CO₂ para 2020, y del 21-45% para 2050.

Además, en unas cuantas décadas, los vectores energéticos como la electricidad o el hidrógeno, cuyo uso no emite carbono, podrían empezar a remplazar los combustibles fósiles utilizados en la actualidad por las pequeñas fuentes de emisión no centralizadas en hogares, negocios o transportes.

Estos vectores energéticos podrían producirse a partir de combustibles fósiles y/o de biomasa en grandes plantas centralizadas que generarían amplias fuentes de CO₂ adaptadas a la captura de dióxido de carbono. Tales aplicaciones podrían reducir las emisiones diseminadas de CO₂ provenientes del transporte y de los sistemas de suministro de energía no centralizados, aumentando el potencial de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC).

3.2. OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA CAPTURA DE CO₂.

Actualmente existen tres tecnologías de CAC. La investigación, desarrollo y demostración de estas tecnologías persigue la reducción de los costes de la captura, actuando sobre la eficiencia de los procesos.

3.2.1 CAPTURA DIRECTA DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

La captura directa del Dióxido de Carbono se presenta cuando el hombre hace uso de las tecnologías que tiene a la mano y con ello busca la solución de los problemas que enfrenta en situaciones ambientales. En este caso darle solución al calentamiento global que se está viviendo con la emisión excesiva del CO₂ a la atmósfera, aplicando tres tecnologías: (**PRECOMBUSTIÓN, POSTCOMBUSTIÓN Y OXICOMBUSTIÓN**).

3.2.2 PRECOMBUSTIÓN.

Esta tecnología se emplea generalmente en procesos de gasificación de carbón. Al gasificar el combustible con oxígeno se produce gas de síntesis que contiene principalmente CO y H₂. El monóxido de carbono se hace reaccionar con agua para generar más H₂ (y más CO₂). El hidrógeno se aprovecha energéticamente en una turbina para producir electricidad, o bien se almacena para su uso posterior, mientras

que el CO_2 se separa para su transporte y almacenamiento. La ventaja principal de esta opción es que el CO_2 se encuentra relativamente concentrado antes de la separación y además se haya a elevada presión por lo que se puede emplear métodos de separación eficientes.

Estos sistemas se sitúan en las instalaciones antes de realizar la combustión del combustible. El objetivo de estos sistemas es preparar el combustible para que al realizar la combustión no se produzca CO_2 . Es decir en estos sistemas se elimina el carbono del combustible antes de realizar la combustión. La principal tecnología de estos sistemas son los GICC.

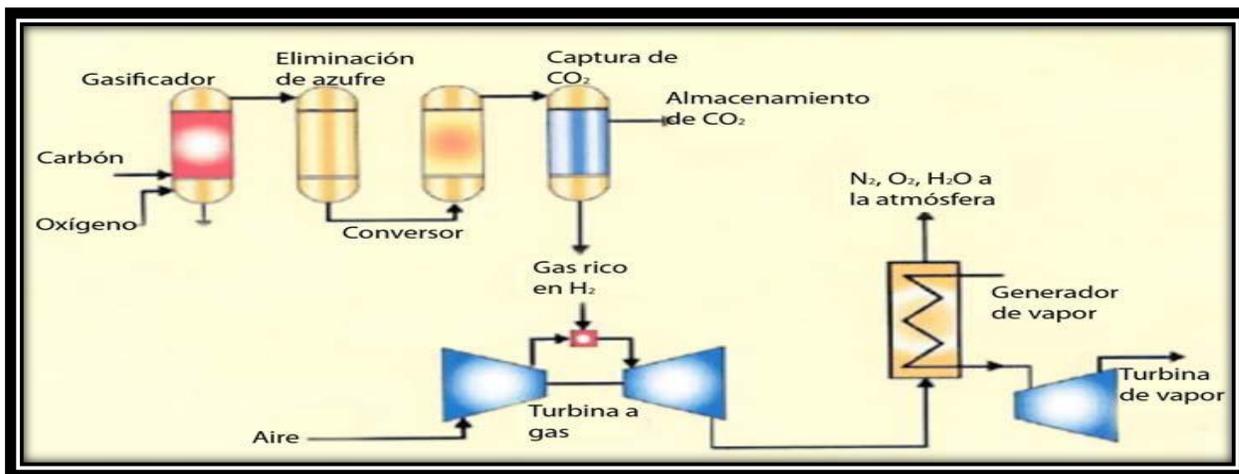


Diagrama 1. Herzog, H.; Caldeira, K.; Adams, E. Secuestro de Carbón vía inyección directa, <http://web.mit.edu/energylab/www/hjherzog>. Encyclopedia of Ocean Science, 2004.

3.2.3 POSTCOMBUSTIÓN.

El CO_2 es separado de los gases tras la combustión convencional de combustibles fósiles que contienen mayoritariamente nitrógeno procedente del aire empleado en la combustión. La opción más prometedora en esta categoría es la absorción química con aminas, en la que corriente de gases de combustión pasa por una columna que contiene un sorbente líquido que capta el CO_2 ; la corriente líquida sufre una etapa de regeneración en el cual el CO_2 absorbido se libera para su posterior transporte y almacenamiento.

Estos sistemas se sitúan en las instalaciones, una vez que se ha realizado la combustión del combustible. De esta forma se parte de una corriente con una concentración muy baja en CO_2 y un gran caudal de gases de combustión. Estas características hacen que estos sistemas requieran una gran cantidad de energía.

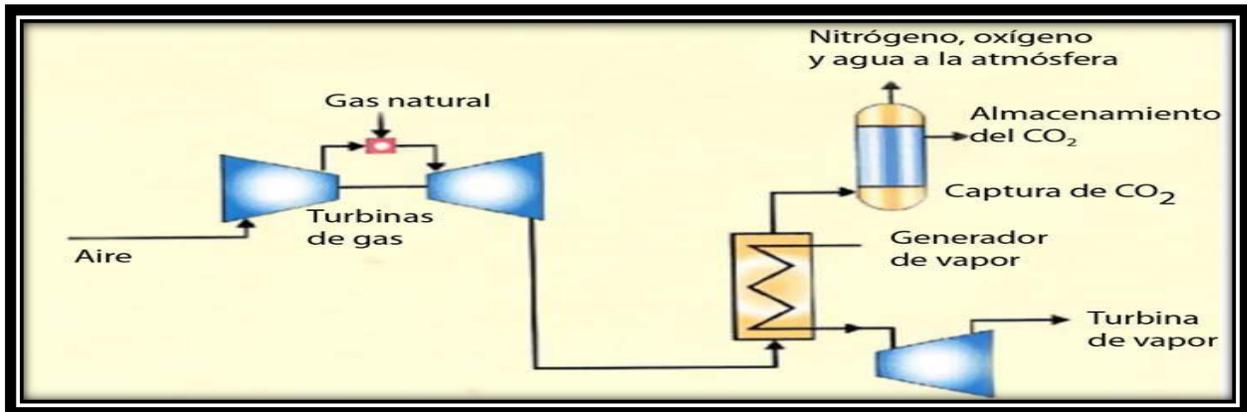


Diagrama 2. Herzog, H.; Caldeira, K.; Adams, E. Secuestro de Carbón vía inyección directa, <http://web.mit.edu/energylab/www/hjherzog>. Enciclopedia de ciencia Océano, 2004.

3.2.4 OXICOMBUSTIÓN.

La combustión se realiza con oxígeno y no con aire, lo que hace que los gases de combustión estén constituidos casi exclusivamente por CO₂ y agua que se separa de forma relativamente sencilla. Este proceso requiere producción de oxígeno (como el anterior) y disposiciones especiales para poder realizar la combustión, pero constituye una tecnología altamente prometedora.

Estos sistemas actúan sobre el comburente, tratando de eliminar el N₂ del aire y de esa forma al producirse la combustión se obtendrán unos gases de combustión con una alta concentración de CO₂.

Una vez que se dispone de un gas con alto contenido en CO₂, para su confinamiento es preciso comprimirlo a elevada presión, más de 200 bar, e inyectarlo en almacenamientos adecuados (no tienen que ser forzosamente subterráneos y de hecho los oceánicos no lo son), pero se consideran las siguientes opciones:

3.3. CONFINAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

3.3.1) Estructuras geológicas que contuvieron petróleo o gas u otras de similar estructura.

Son abundantes y están siendo investigadas para almacenamiento de gas natural e incrementar la capacidad de respuesta de la red de transporte y suministro de este

combustible. Más sin embargo es posible que se confinar en estas estructuras el dióxido de carbono, y como tal aprovechar a su máxima capacidad, tomando en cuenta el lugar y la posibilidad de tener en cercanía un foco emisor de dióxido de carbono para poder almacenarla y así evitar el proceso de calentamiento global.

3.3.2) Acuíferos salinos.

Son estructuras geológicas profundas con una porosidad y características que permiten la presencia de acuíferos con agua salina, en las cuales se puede inyectar CO₂ que quedaría disuelto permanentemente en ellos; es necesario que dispongan de un sello geológico, que garantice su aislamiento. Aunque es preciso desarrollar una investigación geológica detallada que determine la idoneidad de su utilización para este fin, así como la capacidad y el ritmo de llenado que admiten.

3.3.3) Confinamiento oceánico.

Una posible opción de almacenamiento de CO₂ consiste en inyectar el CO₂ captado directamente en los fondos oceánicos (a más de mil metros de profundidad), en que la mayor parte quedaría aislada de la atmósfera durante siglos. Ello puede lograrse mediante el transporte de CO₂ por gasoductos o buques a un lugar de almacenamiento oceánico, donde se inyecta en la columna de agua del océano o en los fondos marinos. Posteriormente, el CO₂ disuelto y disperso se convertiría en parte del ciclo global del carbono. El almacenamiento oceánico aún no se ha desplegado ni demostrado a escala experimental y sigue en la fase de investigación. No obstante, se han realizado experimentos sobre el terreno a pequeña escala, así como 25 años de estudios teóricos, de laboratorio y modelos de almacenamiento oceánico intencional de CO₂.

Los océanos cubren más del 70 por ciento de la superficie terrestre y su profundidad media es de 3 800 metros. Debido a que el dióxido de carbono es soluble en el agua, se producen intercambios naturales de CO₂ entre la atmósfera y las aguas en la superficie oceánica hasta que se alcanza un equilibrio. Si la concentración atmosférica de CO₂ aumenta, el océano absorbe CO₂ adicional gradualmente. De este modo, los océanos han absorbido alrededor de 500 Gt de CO₂ (140 Gt de C) de un total de 1 300 Gt de CO₂ (350 Gt de C) de emisiones antropógenas liberadas en la atmósfera durante los últimos 200 años. Como resultado del aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ causadas por actividades humanas relativas a niveles preindustriales, actualmente los océanos absorben CO₂ con una intensidad de unas 7 Gt de CO₂ al año (2 Gt de C al año).

La mayor parte de este dióxido de carbono reside ahora en las capas superiores del océano y, hasta la fecha, ha dado lugar a una disminución aproximada del 0,1 del pH en la superficie oceánica debido a la naturaleza ácida del CO₂ en el agua. No obstante, hasta ahora no se ha producido prácticamente ningún cambio en el pH de las profundidades oceánicas. Los modelos prevén que durante los próximos siglos los océanos absorberán, finalmente, la mayor parte del CO₂ liberado en la atmósfera a medida que el CO₂ se disuelve en la superficie oceánica y, posteriormente, se mezcla con las aguas de las profundidades oceánicas.

No hay un límite físico práctico de la cantidad de CO₂ antropógeno que puede almacenarse en el océano. No obstante, en una escala cronológica milenaria, la cantidad almacenada dependerá del equilibrio oceánico con la atmósfera. La estabilización de las concentraciones atmosféricas de CO₂ entre 350 y 1000 ppmv supondría que, con el tiempo, habría entre 2000 y 12000 Gt de CO₂ en el océano si no se realizara una inyección de CO₂ intencional.

Por tanto, este margen representa el límite superior de la capacidad del océano para almacenar CO₂ mediante una inyección activa. La capacidad también se vería afectada por los factores ambientales, como el máximo cambio de pH admisible. Los análisis de las observaciones y los modelos de los océanos indican que el CO₂ inyectado quedará aislado de la atmósfera durante, al menos, varios cientos de años, y que la fracción retenida tiende a ser mayor cuando la inyección se realiza a más profundidad. Las ideas para aumentar la fracción retenida comprenden la formación de hidratos de CO₂ sólidos y/o lagos de CO₂ líquidos en el fondo del mar, y la disolución de minerales alcalinos como la piedra caliza para neutralizar el CO₂ ácido. La disolución de carbonatos, en caso de que sea práctica, podría prolongar la escala cronológica del almacenamiento hasta cerca de 10,000 años, minimizando, a un tiempo, los cambios del pH oceánico y de la presión parcial del CO₂. No obstante, este método requeriría cantidades importantes de piedra caliza y de energía para la manipulación de los materiales (aproximadamente, la misma magnitud que las cantidades por tonelada de CO₂ inyectado requeridas para la carbonatación mineral).

3.3.4) Cavidades creadas por disolución en sal.

En este tipo de almacenamientos la cavidad se generaría artificialmente en una formación salina. Por consiguiente es un sistema de gran flexibilidad en cuanto a la capacidad de CO₂ que se puede almacenar, si bien ésta suele ser, en general, limitada. Desafortunadamente, en nuestro país los yacimientos salinos de características adecuadas son escasos y, además, se estima que es la forma de almacenamiento de CO₂ que resulta menos económica. No obstante, las cavidades

salinas creadas por disolución pueden ser la única alternativa en regiones que carecen de otras posibilidades.

Por su parte el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, está desarrollando una investigación en el territorio nacional según los distintos tipos de almacén que podríamos utilizar en este aspecto, y dada la importancia nosotros tendríamos el privilegio de tener el o los lugares óptimos para realizar dicho almacenamiento. Que podemos clasificar en los siguientes:

1. Yacimientos de petróleo agotados.
2. Yacimientos de gas exhaustos.
3. Capas de carbón no explotables con posibilidades de recuperación de metano.
4. Formaciones profundas con agua salada.
5. Formaciones de pizarras bituminosas con altos contenidos en materia orgánica.
6. Áreas geotérmicas de baja entalpía.
7. Yacimientos salinos susceptibles de disolución.

Son tan variadas las posibilidades de poder llevar a cabo esta situación, que las soluciones las tenemos a nuestro alcance, solo basta explorarlas a la mayor brevedad posible y de esta forma enfocarnos a mitigar el cambio climático, que día con día nos agobia rotundamente, y por desgracia o por mera convicción, somos los responsables en gran medida de la situación ambiental que estamos viviendo.

3.4. IMPACTO Y RIESGOS ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES.

La inyección de algunas Gt de CO₂ produciría un cambio apreciable en la química de la región oceánica en que se llevara a cabo, mientras que la inyección de cientos de Gt de CO₂ produciría cambios más importantes en la región que hubiera recibido la inyección y acabaría por causar cambios apreciables en todo el volumen oceánico.

Las simulaciones de modelos en que se supone una liberación desde 7 ubicaciones a 3 000 m de profundidad y un almacenamiento oceánico que aporta el 10 por ciento del esfuerzo de mitigación para la estabilización a un nivel de 550 ppmv de CO₂ prevén cambios en la acidez (cambios del pH) de más de 0,4 en un 1 por ciento del volumen oceánico, aproximadamente. En comparación, en un caso de estabilización a un nivel de 550 ppmv sin almacenamiento oceánico, se estimó un cambio del pH

de más de 0,25 en la superficie oceánica debido a la estabilización con las elevadas concentraciones de CO₂ en la atmósfera. En cualquier caso, un cambio de 0,2 a 0,4 en el pH es considerablemente mayor que las variaciones preindustriales en la acidez oceánica. A lo largo de los siglos, la mezcla de los océanos dará lugar a la pérdida del aislamiento del CO₂ inyectado. A medida que una mayor cantidad de CO₂ fuera alcanzando las aguas de la superficie oceánica, se irían produciendo descargas graduales en la atmósfera desde grandes regiones del océano. No se conoce ningún mecanismo para la liberación repentina o catastrófica en la atmósfera de CO₂ inyectado en el océano.

Los experimentos muestran que la adición de CO₂ puede dañar a los organismos marinos. Los efectos de los niveles elevados de CO₂ han sido estudiados, principalmente, en escalas cronológicas de hasta varios meses en distintos organismos que viven cerca de la superficie oceánica. Los fenómenos observados incluyen la reducción de los índices de calcificación, reproducción, crecimiento, suministro de oxígeno circulatorio y movilidad, así como el aumento gradual de la mortalidad. En algunos organismos, estos efectos se observan como consecuencia de pequeñas adiciones de CO₂. Se prevé una incidencia de mortalidad inmediata en las proximidades de los puntos de inyección o los lagos de CO₂. Los efectos crónicos de la inyección directa de CO₂ en el océano sobre los organismos o ecosistemas en amplias zonas oceánicas y durante largos períodos de tiempo aún no han sido estudiados.

No se ha llevado a cabo ningún experimento controlado del ecosistema en las profundidades oceánicas, por lo que sólo puede ofrecerse una evaluación preliminar de los efectos potenciales sobre el ecosistema. Se prevé que las repercusiones en el ecosistema aumentarán con las crecientes concentraciones de CO₂ y el pH decreciente, pero aún no se conoce el carácter de tales repercusiones, y todavía no se han establecido criterios ambientales para evitar efectos desfavorables. En este momento, tampoco está claro, dado el caso, cómo se adaptarían las especies y los ecosistemas a los cambios químicos prolongados.

3.5. PERCEPCIÓN PÚBLICA.

Los tratados internacionales y regionales en materia de derecho marítimo y medio marino, como el OSPAR y la Convención de Londres mencionados anteriormente con los lugares de almacenamiento geológico, afectan también el almacenamiento oceánico, ya que atañen a la zona marítima.

Tanto el OSPAR como la Convención establecen una distinción entre el método de almacenamiento utilizado y la finalidad del almacenamiento a fin de determinar la

condición jurídica del almacenamiento oceánico de CO₂. No obstante, de momento, no se ha adoptado ninguna decisión acerca de la condición jurídica del almacenamiento oceánico intencional.

El ínfimo número de estudios sobre la percepción pública que han examinado el almacenamiento oceánico de CO₂ indican que la conciencia o el conocimiento públicos de esta cuestión son mínimos.

No obstante, en los pocos estudios realizados hasta la fecha, el público ha expresado mayores reservas respecto del almacenamiento oceánico que del almacenamiento geológico. Estos estudios también indican que la percepción del almacenamiento oceánico cambió cuando se proporcionó más información al respecto; en uno de los estudios, ello dio lugar a una mayor aceptación del almacenamiento oceánico, mientras que en otro el resultado fue una menor aceptación. La bibliografía señala, asimismo, que se desarrolló una “oposición significativa” en torno a la propuesta de un experimento de liberación de CO₂ en el Océano Pacífico. Más sin embargo es importante destacar que “de no enfrentarnos al problema y al no realizar este sistema de operaciones jamás lo llevaremos a cabo, hay que romper ciertas reglas para ver nitidez y percibir lo que no podemos percibir estando en las reglas”.

CONCLUSIONES.

En el análisis de los gases de efecto invernadero (NO, SO, FC, CH₄ Y EL CO₂), especialmente del CO₂ (Dióxido de Carbono), hoy en día, se sabe que dificulta la vida de los seres vivos de nuestro planeta tierra, agravando problemas ecodemograficos. Se eleva o disminuye la temperatura, o en su caso la variabilidad de tiempos cambia constantemente.

El aumento de la concentración atmosférica de los denominados gases de efecto invernadero (GEI), presentan una tendencia creciente desde el inicio de la industrialización, el aumento de la población y la consiguiente utilización masiva de combustibles fósiles. Problema que se ha agravado en los últimos años y se teme que continúe incesantemente en los próximos años. Aunque es posible a conciencia de la humanidad que se entable un equilibrio entre el medio ambiente, los seres humanos y la industria, esa es una solución convincente y clara mitigando la contaminación atmosférica.

La situación es seria y dada las circunstancias la humanidad trata de solucionar el problema ocasionado, con un proceso de captura eficiente y viable, por medio de la cual se pretende detener las emisiones de gases de efecto invernadero a través de procesos de captura en las industrias o focos emisores de gran talla para su posterior confinamiento.

En este sentido, la medida más importante que es preciso adoptar para prevenir el cambio climático es reducir la generación de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero). Es verdad que la utilización de los combustibles fósiles no se deja de la noche a la mañana, pero optar por visualizar un entorno aún más confiable energéticamente hablando, nos encamina a preservar nuestro entorno y con ello quizás nuestros niveles de emisión disminuyan drásticamente y a nuestro favor, por el bien nuestro y de todos los que habitamos este planeta.

La tecnología de captura del Dióxido de carbono por Oxidación es la más apta para ser utilizada de acuerdo a las características que ofrece (Combustión con Oxígeno y en estos sistemas se actúa sobre el comburente) y posiblemente en un futuro sea incorporada al sistema industrial, con la finalidad de ayudar a minimizar las emisiones de CO₂ en la tierra.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1) Chadwick, R.A.; Zweigel, P.; Gregersen, U.; Kirby, G.A.; Holloway, S.; Johannessen,
- 2) P.N. (2004) Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The
- 3) Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea. *Energy*, 29, 1371-1381.

- 4) Chapman, M., Zatsepin, S.; Crampin, S., (2000) Time-lapse seismic changes in a CO₂ injection process in a fractured reservoir, 70th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl.
- 5) *Geophys.* 1536-1539.

- 6) Fischer D.W; LeFever, J.A.; LeFever, R.D.; Anderson, S.B.; Helms, L.; Whittaker, S.;
- 7) Sorensen, J.A.; Smith, S.A.; Peck, W.D.; Steadman, E.N. y Energy, J.A. (2005)
- 8) Overview of Williston basin geology as it relates to CO₂ sequestration. PCO₂R.
- 9) 25 pp.

- 10) Gerhard, L.C.; Anderson, S.B.; Le Fever, J.A.; Carlson, C.G., (1982): Geological
- 11) Development, origin, and energy mineral resources of the Williston Basin, North
- 12) Dakota: North Dakota Geological Survey Miscellaneous Series 63, 31.

- 13) Gerhard, L.C.; Anderson, S.B.; LeFever, J.A. (1987) Structural history of the Nesson
- 14) Anticline, North Dakota. In: Williston Basin; anatomy of a cratonic oil province, Rocky Mountain (Peterson, J.A., Kent, D.M., Anderson, S.B., Pilatzke, R.H., Longman, M.W. Eds.) Association of Geologists, Denver, CO. 337– 354.

- 15) Green, A.G.; Weber, W.; Hajnal, Z. (1985) Evolution of Proterozoic Terranes beneath
- 16) The Williston Basin: *Geology*, 13, 624–628.

- 17) Gregersen, U.; Michelsen, O.; Sorensen, J.C. (1997) Stratigraphy and facies distribution of the Utsira Formation and the Pliocene sequences in the northern North Sea.

- 18) *Mar. Petrol. Geol.*, 14, 893-914.
- 19) Holloway, S.; Savage, D. (1993) The Potential for Aquifer Disposal of Carbon Dioxide
- 20) In the UK, *Energy Conversion and Management*, 34, 9-11, 925-932.

- 21) Lazaratos, S. K.; Marion, B. P. (1997) Crosswell seismic imaging of reservoir changes

- 22) Caused by CO₂ injection: *The Leading Edge*, 16, 9, 1300-1306.
- 23) Morberg R; Stewart, D.B.; Stachniak, D. (2003) The IEA Weyburn CO₂ monitoring
- 24) And storage project, Proceedings of the 6th International conference on Greenhouse gas control technologies (GHGT-6). (Gale and Kaya eds). (1-4) Kyoto Japan. (219-224).
- 25) Moritis, G. (2002) Enhanced Oil Recovery. *Oil and Gas Journal*, 100, 15, 43-47.
- 26) Moritis, G. (2003) CO₂ sequestration adds new dimension to oil gas production. *Oil and Gas Journal* 101, 9, 71-83.
- 27) Oen, P.M. (2003) the development of the Greater Gorgon Gas Fields. *The APPEA Journal*. 43, 2, 167-177
- 28) Riddiford, F.; Akretche, S.; Tourqui, A. (2003) Storage and sequestration of CO₂ in the In Salah Gas Project, World Gas Conference. Tokyo Riddiford, F.; Wright, I.; Bishop, C.; Espie, T.; Tourqui, A. (2003b) Monitoring
- 29) Geological storage. The In Salah Gas CO₂ storage project. BP exploration.
- 30) Stevens, S.H.; Kuuskra, J.; Gale, J.; Beecy (2001) CO₂ injection and sequestration in
- 31) Depleted oil and gas fields and deep coal seams: worldwide potential and costs.
- 32) *Environmental Geosciences*. 8, 3, 200-209.
- 33) Stewart, S.; Bachu, S. (2001) Suitability of the Western Canada Sedimentary Basin for Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media. Alberta Geological Survey.
- 34) Strutt, M.H.; Beaubien, S.E.; Beabron, J.C.; Brach, M.; Cardellini, C.; Granieri, R.;
- 35) Jones, D.G.; Lombardi, S.; Penner, L.; Quattrocchi, F.; Voltatorni, N. (2003) Soil gas a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: preliminary results from the ENCANA EOR project of Weyburn (Canada).
- 36) Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control
- 37) Technologies. Kyoto. Japón, V1- 391-396.
- 38) Torp, T. A.; Gale, J. (2003) Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs, the
- 39) Sleipner and SACS projects. Proceedings of the 6th International Conference on
- 40) Greenhouse Gas Control Technologies. Kyoto. Japón, V1- 311-316.

- 41) Torp, T.A.; Gale, J. (2004) Demonstrating Storage of CO₂ in Geological Reservoirs:
42) The Sleipner and Sacs Projects. *Energy*, 29, 1361-1369.
- 43) Van der Meer, L.G.H.; Hartmann, C.; Geel, C.; Kreft, E (2005) Re-injecting CO₂ into
44) An offshore gas reservoir at a depth of nearly 4000 m sub-sea. Proceedings of the
45) 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vancouver. Canada, V1, 521-530.
- 46) Van der Meer, L.G.H. (1993) the conditions limiting CO₂ storage in aquifers. *Energy Conversion and Management*, 34, 959-966.
- 48) White, D. (Ed.) (2005) Theme 2: Prediction, monitoring and verification of CO₂
49) Movements. In: IEA GHG Weyburn CO₂ monitoring and storage project summary report, 2000-2004. Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Canada, V3- 73-148.
- 50) White, D. J.; Burrowes, G.; Davis, T.; Hajnal, Z.; Hirsche, K.; Hutcheon, I.; Majer, E.;
- 51) Rostron, B.; Whittaker, S. (2004) Greenhouse gas sequestration in abandoned oil
52) Reservoirs. The IEA Weyburn pilot project. *GSA today* 14, 4-10.
- 53) Whittaker, S.; White, D.; Law, D.; Chalaturnyk, R (2004) IEA GHG Weyburn CO₂
54) Monitoring and storage project. Summary Report 2000-2004. Proceedings of the
55) 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.
56) Vancouver, Canada.
- 57) Whittaker, S. (2004) Investigating geological storage of greenhouse gases in
58) Southeastern Saskatchewan : The IEA Weyburn CO₂ monitoring and storage
59) Project. Saskatchewan Geological Survey- Summary of investigations 2004, Vol. 1.
- 60) www.co2net.com - SACS project.
61) www.fossil.energy.gov - Weyburn project.