

**TECNOLOGÍA DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN SECTORES
INDUSTRIALES**

NATALIA ANDREA PARADA GONZÁLEZ

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C
2017**

**TECNOLOGÍA DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN SECTORES
INDUSTRIALES**

NATALIA ANDREA PARADA GONZÁLEZ

**Monografía para optar por el título de especialista en
Gestión Ambiental**

**DORA MARÍA CAÑON RODRÍGUEZ
ASESORA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del Calificador

Bogotá, D.C., Mayo de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Director de especializaciones

Dr. Luis Fernando Romero Suarez

Director Especialización en Gerencia de la Calidad

Dr. Francisco Archer Narváez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres y abuelitos, por siempre estar ahí, tanto en las buenas como en las malas, por su apoyo incondicional, por las palabras correctas en el momento adecuado, por sus abrazos llenos de energía y amor, por sus sonrisas inspiradoras y más que todo, por creer en mí; todo es gracias y por ustedes.

A mis amigos y compañeros, por su apoyo y compañía a lo largo del camino recorrido, en especial a **Yuly Mojica**, por su amistad y ser un gran sustento en todo momento, desde el inicio de la carrera profesional, hasta la culminación de la especialización.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 19 |
| OBJETIVOS | 20 |
| 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 21 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 21 |
| 1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 25 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN | 26 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 28 |
| 2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL | 28 |
| 2.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO | 32 |
| 2.3 SUMIDEROS DE CARBONO | 37 |
| 2.4 MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO | 42 |
| 2.5 CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO ₂ (CAC) | 45 |
| 2.6 SECTORES INDUSTRIALES | 50 |
| 3.6.1 <i>Construcción, Cemento.</i> | 51 |
| 3.6.2 <i>Energético, energía eléctrica.</i> | 53 |
| 3.6.3 <i>Energético, petróleo.</i> | 55 |
| 3. DISEÑO METODOLÓGICO | 58 |
| 4. EL DIÓXIDO DE CARBONO COMO GAS DE EFECTO INVERNADERO | 59 |
| 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUMIDEROS DE CARBONO | 69 |
| 5.1 OCÉANOS | 72 |
| 5.2 TUNDRA | 76 |
| 5.3 BOSQUES | 79 |
| 5.3.1 <i>Bosque tropical.</i> | 82 |
| 5.3.2 <i>Bosque boreal o taiga.</i> | 85 |
| 5.3.3 <i>Bosque templado.</i> | 87 |
| 5.4 PASTIZALES | 88 |
| 5.5 HUMEDALES | 90 |
| 6. SECTORES INDUSTRIALES Y PROCESOS GENERADORES DE DIÓXIDO DE CARBONO | 94 |
| 6.1 SECTOR CONSTRUCCIÓN - CEMENTO | 94 |
| 6.2 SECTOR ENERGÉTICO | 102 |
| 6.2.1 <i>Generación de electricidad por termoeléctricas de carbón.</i> | 103 |
| 6.2.2 <i>Venteo y quema de gas en la producción de petróleo.</i> | 108 |

| | |
|---|------------|
| 7. CAPTURA Y ALMACEMIENTO DE CARBONO | 112 |
| 7.1 CAPTURA DE CO ₂ | 113 |
| 7.1.1 <i>Sistemas de captura de CO₂.</i> | 113 |
| 7.1.1.1 Post-combustión. | 114 |
| 7.1.1.2 Pre-combustión. | 116 |
| 7.1.1.3 Oxi-combustión parcial y total. | 117 |
| 7.1.2 <i>Tecnologías para la captura de CO₂.</i> | 119 |
| 7.1.2.1 Separación con disolventes. | 119 |
| 7.1.2.2 Membranas de separación. | 120 |
| 7.1.2.3 Separación criogénica. | 120 |
| 7.2 TRANSPORTE DE CO ₂ | 122 |
| 7.3 ALMACENAMIENTO DE CO ₂ | 124 |
| 7.3.1 <i>Almacenamiento geológico.</i> | 125 |
| 7.3.1.1 Yacimientos de gas y petróleo agotados. | 129 |
| 7.3.1.2 Formaciones salinas. | 129 |
| 7.3.1.3 Capas de carbón profundas. | 131 |
| 7.3.2 <i>Almacenamiento oceánico.</i> | 132 |
| 7.3.3 <i>Carbonatación mineral.</i> | 135 |
| 7.3.4 <i>Usos industriales.</i> | 137 |
| 7.4 COSTOS | 146 |
| | |
| 8. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO | 156 |
| 8.1 HERRAMIENTA PARA LA MITIGACIÓN | 156 |
| 8.2 IMPORTANCIA EN SECTORES INDUSTRIALES | 160 |
| | |
| 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 165 |
| | |
| 10. CONCLUSIONES | 168 |
| | |
| 11. RECOMENDACIONES | 170 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 171 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970 - 2010 | 29 |
| Figura 2. Fundamento del efecto invernadero | 31 |
| Figura 3. Efecto invernadero y calentamiento global | 32 |
| Figura 4. Emisiones antropógenas globales de CO ₂ | 34 |
| Figura 5. Gases de efecto invernadero y su porcentaje de efecto invernadero según cantidad | 34 |
| Figura 6. Compartimentos y flujos globales de carbono (Gt de carbono) | 37 |
| Figura 7. Ciclo del carbono | 38 |
| Figura 8. El proceso de fotosíntesis | 39 |
| Figura 9. Almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres (Tonelada por hectárea) | 42 |
| Figura 10. Diagrama esquemático de los posibles sistemas de CAC | 46 |
| Figura 11. Esquema de la captura y secuestro del CO ₂ | 47 |
| Figura 12. Visión general de los procesos y los sistemas de captación de CO ₂ | 48 |
| Figura 13. Opciones de almacenamiento de CO ₂ | 49 |
| Figura 14. Estructura simplificada de la cadena del cemento | 51 |
| Figura 15. Proceso de fabricación de cemento | 52 |
| Figura 16. Central térmica generadora de energía eléctrica | 54 |
| Figura 17. Emisiones directas de CO ₂ y emisiones de GEI distintos del CO ₂ , para escenarios de referencia y escenarios de mitigación. | 55 |
| Figura 18. Cadena de valor de los hidrocarburos | 56 |
| Figura 19. Quema de gas en producción de petróleo | 57 |
| Figura 20. Efecto invernadero natural y su forzamiento, lo que induce al calentamiento global | 62 |
| Figura 21. Oscurecimiento global | 63 |
| Figura 22. Flujo del dióxido de carbono en el planeta | 64 |
| Figura 23. Respuesta del clima a las emisiones antropógenas para diferentes escenarios | 67 |
| Figura 24. Global carbon dioxide Budget | 71 |
| Figura 25. Proceso del ciclo del carbono | 71 |
| Figura 26. Vista microscópica del fitoplancton | 73 |
| Figura 27. Proceso de acidificación de los océanos | 74 |
| Figura 28. Tundra ártica en Alaska | 77 |
| Figura 29. Distribución global del permafrost | 78 |
| Figura 30. Cambio de flujos de carbono en el tiempo en diferentes ecosistemas | 79 |
| Figura 31. Diagrama de los flujos (f) y almacenes (a) de carbono en un ecosistema forestal | 81 |
| Figura 32. Distribución y flujo de carbono en un ecosistema terrestre | 82 |
| Figura 33. Distribución de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales en Colombia | 84 |

| | |
|---|-----|
| Figura 34. Bosque boreal | 86 |
| Figura 35. Densidad de carbono existente encima del suelo en determinados tipos de vegetación | 88 |
| Figura 36. Pastizales en el mundo | 90 |
| Figura 37. Esquema del almacenamiento de carbono en los humedales | 92 |
| Figura 38. Fuentes mundiales promedio de CO ₂ en el proceso de producción de Cemento Portland Ordinario (OPC) – proceso considerado: horno rotativo seco con pre-calentador/pre-calcinador | 97 |
| Figura 39. Emisiones de GEI en procesos industriales (MTCO ₂ eq) | 98 |
| Figura 40. Evolución de las emisiones de GEI asociadas a procesos industriales (MMTCO ₂ eq) | 98 |
| Figura 41. Impacto de las diferentes opciones de reducción en las emisiones relacionadas con el cemento en el 2050 | 100 |
| Figura 42. Posible configuración de una planta de cemento con tecnologías de oxidación | 101 |
| Figura 43. Evolución emisiones de CO ₂ equivalente vs. Consumo de energía año 1984-2006 | 103 |
| Figura 44. Emisiones globales de CO ₂ por sector industrial | 105 |
| Figura 45. Central térmica convencional de carbón. | 106 |
| Figura 46. Captura y Almacenamiento de Carbono en una Central Térmica | 107 |
| Figura 47. Esquema de la planta piloto Mikawa, TOSHIBA | 108 |
| Figura 48. Consumo de energía mundial por tipo de combustible, 1990-2040 | 110 |
| Figura 49. Configuraciones de los sistemas de captura | 113 |
| Figura 50. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de CO ₂ de los gases de combustión por absorción química | 116 |
| Figura 51. Esquemas generales de los principales procesos de separación relevantes para la captura de CO ₂ | 121 |
| Figura 52. Visión general de las opciones de almacenamiento geológico | 126 |
| Figura 53. Captura, transporte y almacenamiento de CO ₂ | 126 |
| Figura 54. Seguridad del almacenamiento geológico dependiendo del mecanismo de almacenamiento de CO ₂ en formaciones geológicas | 128 |
| Figura 55. Diagrama simplificado del proyecto de almacenamiento de CO ₂ Sleipner | 130 |
| Figura 56. Simulación del cambio del pH oceánico por las emisiones de CO ₂ | 135 |
| Figura 57. Esquema del proceso de carbonatación para una central eléctrica con CAC | 136 |
| Figura 58. Flujos de materiales y fases del proceso relacionado con la carbonatación mineral de las rocas de silicatos o los residuos industriales | 136 |
| Figura 59. Proyectos de captura y almacenamiento de carbono a gran escala en todo el mundo | 140 |
| Figura 60. Comparación de costos de transporte (USD/TonCO ₂) por distancia (km) y tipo de transporte | 150 |
| Figura 61. Coste total de CAC para diferentes fases | 152 |
| Figura 62. Costes adicionales para la CAC por tonelada de CO ₂ en euros | 154 |
| Figura 63. Precio de la tonelada de CO ₂ y de los CER en los años 2010-2017 | 155 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64. Importancia de iniciar proyectos de CAC globalmente para cumplir con la capacidad de almacenamiento esperada y necesaria | 158 |
| Figura 65. Posibles rutas de fugas y técnicas de saneamiento para el CO ₂ inyectado en formaciones salidas | 159 |
| Figura 66. Emisiones de CO ₂ y de GEI distintos del CO ₂ directas de los sectores en los escenarios de referencia y de mitigación con y sin CAC | 162 |
| Figura 67. Objetivos de la ruta del cemento | 163 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Vida, eficacia radiativa y potenciales de calentamiento mundial directo (excepto el CH ₄) relacionados con el CO ₂ | 36 |
| Tabla 2. Producción y consumo de cemento en los años 2010, 2011 y 2012 (En miles de toneladas) | 95 |
| Tabla 3. Esquema de los procesos para las diferentes técnicas de captura de carbono | 119 |
| Tabla 4. Grado actual de madurez de los componentes del sistema de CAC | 138 |
| Tabla 5. Proyectos de Captura y Almacenamiento de Carbono a gran escala a nivel mundial | 141 |
| Tabla 6. Escala de costos correspondientes a los componentes de un sistema de CAC en el 2002 | 146 |
| Tabla 7. Escala de costos totales correspondientes a la captura, transporte y almacenamiento geológico | 147 |
| Tabla 8. Perfil por procesos o actividades industriales de las grandes fuentes estacionarias de CO ₂ de todo el mundo | 161 |

ABREVIATURAS

| | |
|-----------------------------|--|
| ANH: | Agencia Nacional de Hidrocarburos |
| AO: | Acidificación del océano |
| CAC: | Captura y Almacenamiento de Carbono |
| CECODES: | Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible |
| CER: | Certificados de Emisiones Reducidas |
| CH₄: | metano |
| CMNUCC: | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| CO₂: | dióxido de carbono |
| CONAMA: | Congreso Nacional del Medio Ambiente |
| COP21: | Conferencia 21 de las partes de la CMNUCC |
| CSI: | Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento (por sus siglas en inglés) |
| DNP: | Departamento Nacional de Planeación |
| FAO: | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés) |
| FICEM: | Federación Interamericana de Cemento |
| GEI: | gases de efecto invernadero |
| GGFR: | Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas (por sus siglas en inglés) |
| GtCO₂-eq: | Giga-tonelada de dióxido de carbono equivalente |
| IAEA: | Agencia Internacional de Energía Atómica (por sus siglas en inglés) |
| IAVH: | Instituto Alexander von Humboldt |
| IEA: | Agencia Internacional de la Energía (por sus siglas en inglés) |

| | |
|------------------------|--|
| IPA: | Asociación Internacional del Permafrost (por sus siglas en inglés) |
| IPCC: | Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (por sus siglas en inglés) |
| IRENA: | Agencia Internacional de la Energía Renovable |
| km: | kilómetro |
| kt: | kilotón |
| MPa: | mega-pascales |
| Mt: | megatón |
| N₂O: | óxido de nitrógeno |
| O₃: | ozono |
| OLA: | Organización Latinoamericana de Alcaldes |
| ONU: | Organización de las Naciones Unidas |
| pH: | potencial de hidrógeno |
| PIB: | producto interno bruto |
| PMEL: | Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico (por sus siglas en inglés) |
| PNUMA: | Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente |
| ppm: | partes por millón |
| SINIA: | Sistema Nacional de Información Ambiental |
| UNESA: | Asociación Española de la Industria Eléctrica |
| UPME: | Unidad de Planificación Minero Energética |
| WBCSD: | Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (por sus siglas en inglés) |
| ZEP: | Plataforma de Emisiones Cero (por sus siglas en inglés) |

GLOSARIO

ALTERNADOR: máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en eléctrica.

BASALTO: roca volcánica compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica y piroxeno, puede contener cantidades menores tanto de cuarzo como de olivino o feldespatoídes. Su formación es producto del rápido enfriamiento del magma que expulsan los volcanes.

BIOMA: conjunto de ecosistemas que se caracterizan por una composición de especies en fauna y flora, principalmente por una comunidad vegetal predominante y el clima.

BIOMASA: materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente.

CALCITA: mineral formado por carbonato cálcico (CaCO_3)

CALDERA: máquina o dispositivo que genera vapor.

CALOR LATENTE: energía requerida por una sustancia para cambiar de fase.

CAPEX: cantidad que se gasta para adquirir o mejorar los activos productivos con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia de una empresa

CARBONO EQUIVALENTE: el dióxido de carbono equivalente es una medida del potencial de calentamiento mundial que permite que todos los gases de efecto invernadero puedan compararse de acuerdo a un parámetro común: el del dióxido de carbono.

CLINKER: producto principal del cemento común, es una sustancia que se obtiene como resultado de una calcinación en horno de mezcla de calizas arcillosas, en otras palabras, caliza cocida.

COMBUSTIÓN: reacción química que se produce entre el oxígeno y otro material de características combustibles que un desprendimiento de energía en forma de calor y luz.

CONDENSADOR: dispositivo que actúa como un intercambiador de calor entre fluidos.

DISOLVENTE: sustancia líquida que disuelve o disocia otra sustancia a una forma más elemental, normalmente es el componente de mayor cantidad en una solución.

EBULLICIÓN: proceso físico mediante el cual el líquido pasa a estado gaseoso, por lo tanto, el punto de ebullición es la temperatura a la cual ocurre ese proceso.

EFICACIA RADIATIVA: también conocida como forzamiento radiativo es un cambio en el flujo de energía radiante en la parte superior de la atmósfera, puede darse debido a una variación del causante externo del calentamiento global, como lo es la radiación solar, es expresada en $W m^{-2}$.

EURASIA: zona geográfica que comprende a Europa y Asia juntas.

FOLLAJE: cantidad de ramas y hojas encontradas en los árboles, arbustos y plantas en general.

GEOINGENIERÍA: manipulación intencional a gran escala del medio ambiente de nuestro planeta para combatir el cambio climático, resultado de la actividad humana.

HIDRATO: término utilizado para indicar que una sustancia tiene agua

HIDROCARBUROS: compuestos de carbono e hidrógeno, entre ellos se encuentra el petróleo y el gas.

HUMUS: capa superior del suelo que se compone por materia orgánica en descomposición.

IÓN: átomo o grupo de átomos que tiene una carga eléctrica ya sea positiva o negativa.

LICUACIÓN: o licuefacción, es el proceso de hacer que una sustancia gaseosa o sólida, se convierta en líquida.

LIGNITO: carbón mineral que se forma por compresión, es desmenuzable.

PERMAFROST: capa de suelo o roca que permanece a una temperatura de $0^{\circ}C$ o menos por lo menos dos años consecutivos en una profundidad variable.

PERMEABILIDAD: capacidad que tiene un material para dejar fluir los fluidos por sus poros interconectados, sin alterar su estructura.

POROSIDAD: medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos en los espacios vacíos en una roca, se calcula como la fracción de huecos sobre el volumen total

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO MUNDIAL O GLOBAL: valor relativo que expresa que radiación infrarroja atrapa en la atmósfera un GEI a la atrapada por la

misma masa de CO₂. De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radiativos de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera.

POTENCIAL DE HIDRÓGENO: comúnmente encontrado en la literatura como pH, es una medida de acidez o alcalinidad de una sustancia, se encuentra entre 0-14, donde 7 es el neutro.

PRODUCTO INTERNO BRUTO: indicador económico utilizado para medir la producción en un país dado.

SOLUBILIDAD: capacidad de una sustancia para disolverse en otra.

SUMIDERO DE CARBONO: proceso en el que el dióxido de carbono producido desde fuentes industriales y energéticas relacionados se separa (captura), acondiciona, comprime y transporta a una ubicación de almacenamiento subterráneo para una aislamiento, de largo plazo, de la atmósfera.

UREA: también conocida como carbamida, CO(NH₂)₂, es una sustancia nitrogenada, soluble en agua.

YACIMIENTO: cuerpo rocoso subterráneo que tiene porosidad y permeabilidad suficientes como para almacenar y transmitir fluidos.

RESUMEN

La presente monografía analiza la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC) como sumidero artificial y su contribución para mitigar los efectos del calentamiento global. Con una revisión sistemática de información, se estudia el dióxido de carbono GEI y sus efectos en el calentamiento global, el papel y características de los sumideros naturales y artificiales; también los sectores industriales específicamente el de construcción enfocado en la industria del cemento y el sector energético, por ser generadores importantes de GEI. Se presentan datos relevantes relacionados con el proceso de captura, transporte y almacenamiento de carbono, adicionalmente se identifican algunos factores por los cuales la CAC aun no es una tecnología comercial a gran escala y las razones que proyectan a la tecnología de captura y almacenamiento de carbono, como la opción más eficiente en cuanto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Calentamiento global, gases de efecto invernadero, sumideros de carbono, Captura y almacenamiento, sectores industriales.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia del planeta Tierra, ha existido el cambio climático; periodos de sequía e intenso calor, también de congelamiento e inundaciones. Pero desde la industrialización, se ha evidenciado una alteración climática; el ser humano ha buscado el desarrollo cultural, intelectual y tecnológico; para los cuales utiliza recursos naturales, que con el mal uso y la sobre explotación, se están agotando; además de ello, con los procesos que se realizan en diferentes sectores industriales, se generan emisiones, las cuales son "(...) materiales, sustancias o formas de energía que se descargan en el ambiente como resultado de una actividad, bien sea de origen natural o antrópico"¹.

Dependiendo de la actividad, es generada la emisión y una a las que más importancia se le ha dado por sus efectos y cantidad es a la del dióxido de carbono (CO₂), éste es un gas que se encuentra de forma natural, pero al ser resultado de un proceso o de intervención humana, causa diversos efectos; adicionalmente, este es uno de los gases de efecto invernadero el cual contribuye al calentamiento global al encontrarse en grandes concentraciones en la atmósfera.

Para regular su cantidad, la naturaleza tiene sumideros de carbono los cuales absorben o lo eliminan el carbono por medio de la fotosíntesis; los más significativos son los océanos y los bosques; según Zambrano², ese último cubre el 29% de las tierras y contiene cerca del 60% de la vegetación terrestre. Pero últimamente, con la deforestación, incendios y el mal uso del suelo, se está perdiendo la capacidad de absorber carbono; aunándole a ello las cantidades de gases que se emiten. Es por ello que los sumideros naturales se están saturando, razón por la cual, en el Protocolo de Kyoto se les dio gran importancia, para ayudar a preservarlos y darles un buen manejo y así contribuir a la mitigación del calentamiento global.

Durante el último siglo, el XXI, los sectores industriales en sus procesos generan grandes cantidades de CO₂, en especial las eléctricas, las cementeras y petroleras; por ello es importante hacer una transición al uso de energías renovables y a la eficiencia energética, buscando el bienestar para el planeta tierra con la colaboración de la tecnología ha ayudado al hombre a evolucionar, a crear nuevas cosas y llegó la hora de utilizarla para ayudar a mitigar lo que ha causado, el calentamiento global; la *captura y almacenamiento de dióxido de carbono*, es una técnica para reducir las emisiones de CO₂ causadas por actividades de origen antropogénico en las industrias, las cuales lo capturan, separan, transportan y almacenan en un lugar determinado.

A lo largo de la monografía se analiza el funcionamiento de la tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, su estado actual, ventajas y desventajas; y como contribuye a la mitigación del calentamiento global.

¹ CHAPARRO, Luis, *et al.* Emisiones al ambiente en Colombia. En: El medio ambiente en Colombia. 2009; p. 531.

² ZAMBRANO, Alexis; FRANQUIS, Félix e INFANTE, Ángel. Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. En: Rev.For.Lat. No.35. 2004; p. 14.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) y su contribución para mitigar el calentamiento global.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el papel del CO₂ como GEI en el calentamiento global.
- Explicar las características de los sumideros de carbono naturales y artificiales.
- Identificar los sectores industriales y procesos que producen CO₂.
- Describir el funcionamiento de la tecnología de CAC.
- Averiguar el papel de la tecnología de CAC como aporte en la mitigación del cambio climático.
- Evaluar la importancia de la tecnología de CAC en los sectores estudiados.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

Desde la revolución industrial, es decir, desde la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX el hombre cambió, empezó la búsqueda de la evolución, la era tecnológica y con ella diversos efectos llegaron, los cuales trajeron consigo un problema enorme el cual se ha denominado calentamiento global que hace parte del cambio climático.

Éste se define como “(...) el conjunto de cambios ambientales afectados por la actividad humana que tienen efecto sobre el funcionamiento del planeta tierra”³. Otra definición que se encuentra en la literatura según Benavides⁴, es la alteración del equilibrio planetario en el cual hay un aumento en la temperatura media de la superficie terrestre, éste ocurre cuando se encuentra una concentración alta de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, la cual es una capa gaseosa que rodea la tierra, está compuesta de nitrógeno y oxígeno en su mayoría, junto con otros gases. Éstos son los GEI los cuales absorben y emiten radiación lo que produce el efecto invernadero y son de carácter tanto natural como antropogénico, es decir, el resultado de actividades humanas.

Desde la década de 1750 por la era industrial, los GEI han aumentado; de acuerdo a Baethgen⁵, el CO₂ ha incrementado más del 30%, el CH₄ más del 100% y el N₂O en un 15%. El dióxido de carbono es uno de los más importantes en el calentamiento global y tiene un papel en varios procesos humanos biológicos, así como en actividades industriales de quema de combustibles fósiles, generación de energía, fabricación de cemento, entre otras. Cuando se encuentra una suficiente cantidad de los gases anteriormente nombrados, los rayos del sol quedan atrapados en la atmósfera, actuando como el techo de vidrio de un invernadero y por ende la temperatura de la tierra incrementa, es por eso el nombre de los GEI.

Distintas razones se asocian para ser causa del calentamiento global, entre las cuales se encuentra el crecimiento poblacional, la explotación de hidrocarburos, la sobreexplotación de recursos naturales, las emisiones generadas por las industrias, etc. Una evidencia del incremento de la temperatura se encuentra en el

³ FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. Los sumideros de carbono a nivel local. 2011. 162p.

⁴ BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. En: Nota técnica del IDEAM. Vol. 8, (Dic, 2007); p. 5-36.

⁵ BAETHGEN, Walter y MARTINO, Daniel. Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono. En: Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. Vol.2, No. 2 (Jun, 2001); p. 128.

Informe de Síntesis del IPCC⁶ del año 2015, y es que durante el siglo XX, ésta fue de aproximadamente $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. También, como lo dice Doménech⁷, algunos efectos que ha producido y puede producir, es el aumento del nivel del mar, el deshielo de glaciares y casquetes polares, temperaturas extremas, desarrollo de más plagas y enfermedades tropicales, daños en ecosistemas y agricultura, mayor mortalidad e incremento de la contaminación atmosférica en ciudades, etc.

Por lo anterior, acorde con Doménech⁸ el ser humano se percató que el clima está cambiando, que tiene relación directa con sus acciones, así que empezó a tomar conciencia, realizando la primera gran conferencia de la ONU sobre asuntos medioambientales; la Declaración de Estocolmo en 1972, donde se reconoce la importancia de velar por la conservación del medio ambiente humano, ésta aumentó la conciencia política y pública sobre la naturaleza, ese fue el inicio de tratados, cumbres y protocolos que se realizarán años después. En el 1992, se realizó la Declaración de Río sobre el medio ambiente y desarrollo, donde se comprometieron más de 150 países a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2000 en comparación a los que se encontraban en el año 1990 para lograr un desarrollo sostenible.

Posteriormente, en el 1997 como lo informa Duarte⁹ refiriéndose a el Protocolo de Kyoto, el cual tuvo lugar y buscó estabilizar las emisiones de GEI para países industrializados y la Unión Europea ya que son los mayores responsables de éstas; su objetivo principal era emitir gradual y cronológicamente menores cantidades de GEI dentro del periodo 2008-2012, exactamente, un 5% por debajo de los niveles de emisión con respecto al año 1990. Éste marcó un hito importante en cuanto a los problemas ambientales causados por contaminantes, en especial por el CO₂.

En el Protocolo de Kyoto, además de contemplar las emisiones de gases de efecto invernadero, también incluye el papel de los sumideros de carbono; éstos son “(...) cualquier proceso o actividad o mecanismo que retire de la atmósfera un GEI por

⁶ GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC).. Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. 157p.

⁷ DOMÉNECH, Juan L. Huella ecológica y desarrollo sostenible. Madrid, España: Aenor, 2007. p. 20-21. ISBN: 978-84-8143-517-7.

⁸ *Ibíd.*, p. 28

⁹ BADII, M. H; GUILLEN, O. Lugo y SÁNCHEZ, H. J. Aspectos del Calentamiento Global. *En*: Revista Daena (International Journal of Good Conscience. Vol. 10, No 2 (Ago, 2015); p. 175-195. ISSN 1870-557X

un periodo de tiempo”¹⁰. En los acuerdos del Protocolo se hace referencia a las variaciones netas de las emisiones por las fuentes y la absorción de los sumideros de GEI por acción del ser humano que pueden ser calculadas y verificadas, también a las actividades adicionales que se puedan contabilizar, a los proyectos de aplicación conjunta, a los mecanismos de desarrollo limpio, entre otros; como lo dice Camps¹¹. Además de ello, los sumideros contribuyen al cumplimiento del Protocolo, es por ello que se proponen medidas en las cuales se protegen y mejoran las condiciones de los existentes.

Los sumideros de carbono tienen un papel importante en la mitigación del cambio climático, los principales son los ecosistemas terrestres y el mar, ya que son los que más absorben CO₂ de la atmósfera y se encuentran en constante intercambio de carbono, en el cual la actividad humana tiene participación. Por medio de la fotosíntesis, según la Federación Española de municipios y provincias¹², al fijar el CO₂ atmosférico y transformarlo en cadenas de carbono que componen la biomasa vegetal, es que cualquier sistema natural puede funcionar como un sumidero de carbono.

Como se mencionó anteriormente, tanto los océanos como el suelo son sumideros de carbono naturales, siendo el primero el más importante, gracias al plancton marino que realiza una función de gran magnitud; pero de acuerdo a Ciesla¹³, hay que tener en cuenta que los sumideros no reducen las emisiones de CO₂, sino que disminuyen su concentración en la atmósfera; pero sólo lo hacen temporalmente debido a que cuando se talan, queman y/o cortan los árboles, una parte del carbono que contenían se libera a la atmosfera nuevamente.

Al ser evidente que los sumideros naturales y las conferencias, junto con los protocolos antes establecidos no fueron lo suficientemente eficientes; en el año 2015 se realizó la 21° Cumbre de la Tierra París, también conocida como COP21, en el cual 195 países se reunieron para redactar un sustituto para el Protocolo de Kyoto, en el cual se establecieron metas a cumplir desde el 2020, las cuales reforzarán la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático; entre ellas se

¹⁰ DUARTE, Carlos M, *et al.* Cambio Global, Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. 2da. Madrid, España: CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas). 2006. 170 p. ISBN: 978-84-00-08452-3.

¹¹ CAMPS, M. y PINTO, M. Los sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. En: Edafología. Vol. 11, No.1 (2004); p. 27-36.

¹² FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit, p. 20.

¹³ CIESLA, William. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. Roma, España: Food & Agriculture Org., 1996. p. 16-129. ISBN: 92-5-303664-8.

incluyen, acorde con Gutiérrez¹⁴ en mantener la temperatura media mundial por debajo de los 2°C, aumentar la capacidad de adaptación a los efectos del calentamiento global sin comprometer la producción de alimento e incrementar el apoyo financiero para un desarrollo con bajas emisiones de GEI.

El COP21 no tiene restricción alguna para los países participantes en cuanto a la generación de tecnologías que se consideren adecuadas para lograr los fines propuestos. Según Borrell¹⁵, se hace alusión al uso de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC), que pueden ayudar a lograr los fines fijados, pero no están en total capacidad para superar el desafío ya que se encuentra en estado experimental.

Es por ello que investigar los métodos que ayudan a disminuir la cantidad de CO₂ es de gran importancia, aunque se encuentran los sumideros de carbono en la naturaleza; al estar cumpliendo su tarea a lo largo del tiempo y gracias a los efectos de la actividad humana, hacen que su capacidad de absorber carbono se vaya limitando y esto según Rosas¹⁶ va transformando a los sumideros en una solución parcial en el control del aumento del CO₂ en la atmósfera, causando a futuro que su concentración incremente, trayendo consigo consecuencias catastróficas; razón por la cual se han creado nuevas tecnologías, para que colaboren a reducir las emisiones de gases provenientes de los sectores industriales, especialmente del energético (petrolero, eléctrico) y del de construcción (cemento).

Se entiende por sector industrial o sector secundario según el Banco de la República¹⁷, como aquel conjunto de actividades que implican tanto la extracción como la transformación de materias primas en productos; el anterior, se divide en dos subsectores, el industrial extractivo y el de transformación; el extractivo comprende la extracción minera y petrolera, y el segundo comprende el embotellado, fabricación de abono y fertilizantes, vehículos, electrodomésticos, cemento, entre otros.

¹⁴ GUTIÉRREZ, Wilfredo. COP 21: Acuerdo contra el cambio climático en París. En: Apuntes de Ciencia & Sociedad. Vol. 5, No. 2 (2015); p. 1-3. ISSN-e 2225-515X.

¹⁵ BORRELL, Josep. Una perspectiva europea de los acuerdos de la 21a Conferencia sobre cambio climático de París (COP21). En: Revista de fomento social. No. 281. (Feb, 2016); p. 242. ISSN 0015-6043.

¹⁶ ROSAS, Carlos Al. Sumideros de carbono: ¿Solución a la mitigación de los efectos del cambio climático? En: Revista Ecosistemas. Vol. 11, No. 3 (sept, 2002); p.1-2.

¹⁷ BANCO DE LA REPÚBLICA. Sectores económicos. [En línea]. [12 noviembre de 2016] disponible en: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores_economicos

Acerca de la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ se han realizado investigaciones que dan como resultados libros, informes, estados del arte, artículos de revista; los cuales sirven de apoyo para el desarrollo de la monografía.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Desde la industrialización, el ser humano vive en una continua búsqueda de la evolución, de crear y producir cosas; dejando como rastro de su acción diversos efectos que afectan al planeta Tierra. El calentamiento global o también llamado cambio climático es una de sus consecuencias y uno de los principales problemas con los que se lidia diariamente. La temperatura superficial del mundo ha incrementado, según Baethgen¹⁸, por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el dióxido de carbono (CO₂) el de mayor concentración en la atmósfera y el principal causante del calentamiento; éste proviene mayormente de la industria energética (eléctrica - petrolera) y de construcción (cementera).

Las emisiones de GEI incrementaron gracias al crecimiento económico y demográfico a partir de la segunda mitad del siglo XX, también por la dependencia energética de la sociedad, la demanda de recursos energéticos ha incrementado, aumentando así las emisiones de CO₂, acorde con Duarte¹⁹, se generan 24.000 millones de toneladas al año. Asimismo, el ser humano al talar los árboles de los bosques, al darle distinto uso al suelo, al usar excesivamente fertilizantes y al quemar combustibles fósiles, contribuye a ello.

Si se sigue con la continua emisión de los GEI, se causará un mayor calentamiento y cambios con mayor duración e incluso pueden llegar a ser irreversibles, ya sean para los seres humanos como para los ecosistemas; por ejemplo, la acidificación del océano. En la actualidad es notable el cambio en las precipitaciones, en el derretimiento de la nieve y el hielo, en la elevación del nivel global del mar, en las sequías extremas que a veces originan incendios forestales, en el aumento de la mortalidad humana debido al calor, además de ello, de acuerdo con Benjamín²⁰, algunas especies de animales han modificado su distribución geográfica; una muestra de ello son los vectores transmisores de enfermedades que han llegado a lugares donde antes no llegaban.

Por lo anterior, en los últimos años se han desarrollado tecnologías para ayudar a mitigar el mal causado, para poder reducir las emisiones de CO₂ en las industrias que lo producen en gran cantidad; otro beneficio que trae consigo, es el

¹⁸ BAETHGEN, Walter y MARTINO, Daniel, Op. Cit., p. 128.

¹⁹ DUARTE, Carlos M, *et al*, Op. Cit., p. 51.

²⁰ BENJAMÍN, José y MASERA, Omar. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques. Xalapa, México. Vol. 7. No.1. (2002); p. 3-12. ISSN: 1405-0471.

incremento de la eficiencia energética. La Captura y Almacenamiento de CO₂ (CAC) es la que más se ha desarrollado y está recibiendo apoyo por varios países, principalmente por la Unión Europea.

El sector energético, en especial la industria eléctrica y petrolera, junto con el sector de construcción, principalmente en la industria cementera, como son los de mayor emisión de CO₂, al ver el avance de la tecnología que ayuda al medio ambiente y que también les puede brindar mayor eficiencia energética, pueden hacer uso de ella. Por lo que surgen los siguientes interrogantes: ¿En qué consiste la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂?, ¿Qué actividades realizan los sectores que producen éste gas de efecto invernadero?, ¿Cuál es el estado actual de la tecnología?, ¿Cómo ayuda a mitigar el cambio climático?, ¿La industria energética y de construcción se encuentran interesadas en adquirirla?

Al implementar la tecnología, las industrias además de incrementar su eficiencia energética, disminuirían sus emisiones de CO₂ contribuyendo así a mitigar el calentamiento global; razones de gran importancia ya que traen beneficio no solo para las empresas, sino para la sociedad en general; será para un bienestar general. En el desarrollo de la monografía se busca dar respuesta a los interrogantes anteriormente planteados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El calentamiento global es una realidad que está viviendo el planeta, se refiere al “(...) aumento gradual de las temperaturas de la atmósfera y océanos; éste constituye a la mayor amenaza para el medio ambiente contra la cual el hombre debe luchar con todos sus recursos en los años venideros”²¹. Por lo tanto, no es de extrañar que se hayan y se estén realizando investigaciones para determinar sus causas, sus consecuencias y aún más importante, su mitigación.

Existen diferentes causas, como lo son los aerosoles, el hollín, las variaciones en la órbita de la tierra, la actividad solar; pero la que tiene mayor respaldo científico, es la del incremento de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), en especial el dióxido de carbono (CO₂), siendo éste el cual se encuentra en mayores concentraciones en la atmósfera; según Muñoz²², en el 2009 contenía cerca de 800 mil millones toneladas métricas de carbono, valor que es mayor al que se encuentra contenido en la vegetación.

²¹ IPCC, Op. Cit., p. 129.

²² MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento. Agrupación de fabricantes de cemento de España, 2011. 102 p. ISBN 978-84-615-5702-8.

Por lo anterior, junto con investigaciones recientes, DiCaprio²³ en su documental *Before the Flood*, llega a la conclusión de que es necesario actuar ya y de acuerdo a las opiniones de científicos, con cumplir las metas fijadas en la Cumbre de la Tierra París 2015 no es suficiente para mitigar el cambio climático; lo que hace inevitable la búsqueda de otras medidas que colaboren a ello. Ahí es cuando aparece la tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono que si llega a ser utilizada por sectores industriales, pueden realizar cambios notables, como lo es la reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera, aumento en la eficiencia energética, reconocimiento ante otros sectores e industrias, también a contribuir a mitigar el cambio climático, cumpliendo así las metas del COP21 y más.

Algunas industrias aún no implementan la tecnología CAC y tampoco se han fabricado masivamente por distintos factores ya sean económicos, de infraestructura, regulatorios o de funcionamiento. Es importante comprender cómo funciona esta tecnología, que usos tiene, en que beneficia a las industrias, a la sociedad y al mundo entero.

²³ DICAPRIO, Leonardo. *Before the Flood*. [Película documental]. Producido por Fisher Stevens. Estados Unidos, National Geographic Channel, 2016. 96 minutos.

2. MARCO TEÓRICO

El presente trabajo se realiza para analizar los procesos que generan CO₂ en los sectores industriales, en el energético, es decir, eléctrico y petrolero; y en el de construcción, especialmente en la industria del cemento; y que junto con la tecnología de captura y almacenamiento de este gas de efecto invernadero puedan llegar a contribuir a mitigar el calentamiento global.

2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL

Desde el siglo XVIII y principios del siglo XIX, es decir, desde la era industrial, se ha evidenciado un incremento de las emisiones de gases, en especial del CO₂ (dióxido de carbono); gracias al incremento de la población, al uso de los combustibles fósiles, a la dependencia energética y a el mundo globalizado, que trae consigo afectación al medio ambiente, ya que conforme a Domenéch²⁴, sólo se centra en lo económico y comercial, dejando de lado lo ambiental, social y cultural. En la actualidad, representa el desequilibrio planetario por el cual el hombre deberá luchar, ya sea para mitigarlo, adaptarse o dejar que todo siga su curso.

La afectación más grande y notable para todos es el cambio climático, el cual es un fenómeno natural que se da en la atmósfera, la cual es la capa gaseosa que rodea al planeta tierra y permite la vida, los gases que la componen permiten la entrada de la radiación solar, estos son nitrógeno, oxígeno y argón-helio, se encuentran en un 78%, 21% y 1% respectivamente; así mismo, Badii²⁵ afirma que al ser alterada de manera artificial la cantidad de éstos, incide de forma directa causando un mayor aumento en la temperatura global y es ahí cuando se habla del término calentamiento global. En el último siglo, como han aumentado más rápido las temperaturas, los científicos dicen que es por las actividades del ser humano.

Como se nombró anteriormente, la dependencia energética ha causado un incremento en las emisiones de gases, especialmente el CO₂, que es el principal gas de efecto invernadero, como lo dice Muñoz²⁶, de estas el 90% son de origen artificial, ya sea por la deforestación, quema de combustibles fósiles, entre otros. Las emisiones de GEI causadas por el hombre, también llamadas antropógenas, aumentaron por el crecimiento económico y demográfico, el estilo de vida, uso de

²⁴ DOMÉNECH, Op. Cit., p. 15.

²⁵ BADI, M. H; GUILLEN, O. Lugo y SÁNCHEZ, H. J. Op. Cit., p. 194.

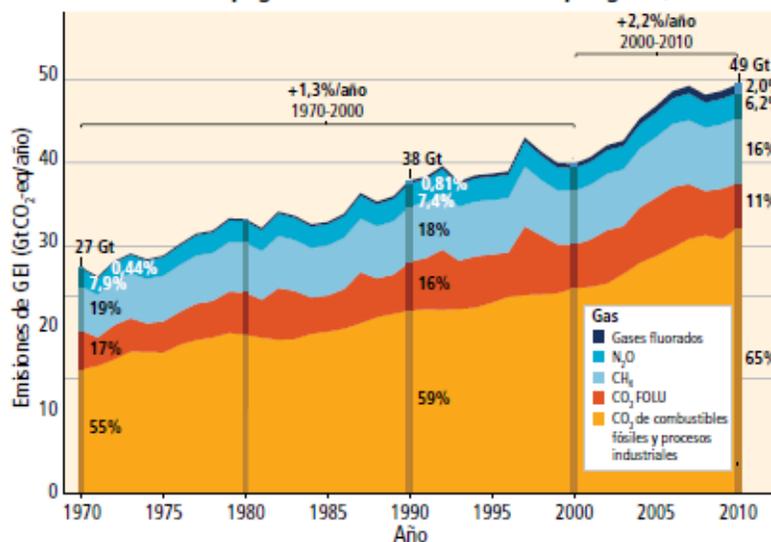
²⁶ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 5.

la energía, tecnología y demás factores; últimamente se encuentran más altas que en cualquier otro momento de la historia, afirma el IPCC²⁷.

Otra definición que se encuentra en la literatura por parte de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) es: "(...) cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables"²⁸. Como se puede apreciar, el significado del problema que une al mundo tiene connotaciones similares en diferentes autores, la mayoría llega al ítem clave, que es la acción antropógena.

En la figura 1, se evidencia el incremento de las emisiones de GEI entre los años 1970-2010, donde según el IPCC²⁹, las de mayor valor expresadas en (GtCO₂-eq/año) giga-tonelada de CO₂ equivalente al año, son las de CO₂ provenientes de combustibles fósiles y procesos industriales, las cuales aumentaron un 15% en 40 años, además de ello, a éste se le suma lo que se encuentra en color naranja que representa las emisiones CO₂ FOLU, que son las provenientes de la silvicultura y de otros usos del suelo.

Figura 1. Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010
Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010



Fuente: GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. p.49.

²⁷ IPCC, Op. Cit., p. 48.

²⁸ KI-MOON, Ban. Cambio climático. [En línea]. [19 enero de 2017] disponible en: http://www.cinu.mx/minisitio/cambio_climatico/

²⁹ IPCC, Op. Cit., p. 49

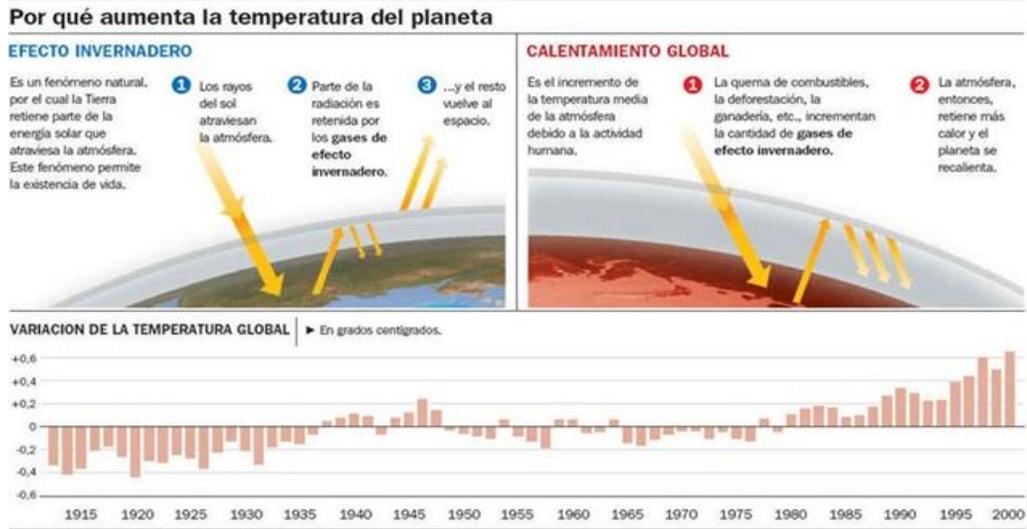
Aunque la mayoría de informes, libros, investigaciones y demás se centran en que el CO₂ emitido por acciones del humano es el responsable del calentamiento global, hay un grupo de científicos los cuales están totalmente en desacuerdo; en el documental *La gran farsa del calentamiento global*, estrenado en el año 2007 y dirigido por Durkin³⁰, científicos afirman que todo tiene que ver con el sol, con los rayos cósmicos que este emite y con las nubes; según unos estudios, cuando hay mayor actividad solar, la temperatura incrementa y esta es la que hace que el CO₂ incremente o disminuye. También dicen que todo es una propaganda, una ideología política el tema del cambio climático para crear pánico y así conseguir dinero, causando así que los países tercermundistas no se desarrollen como es el caso de África, el cual tiene gas y petróleo, pero organismos ambientalistas que son políticos, no los dejan explotarlos.

Sin embargo, en las últimas décadas, el incremento en la temperatura ha sido más agresivo que antes, lo que le da cabida al tema de los gases de efecto invernadero, a los sectores industriales, al calentamiento climático el cual tiene buen respaldo científico. Uno de los temas que se considera causa del último son los gases de efecto invernadero (GEI); se dan gracias al efecto invernadero, el cual es un fenómeno natural que permite la vida en el planeta tierra, ya que sin él la temperatura sería de aproximadamente -18°C; éste se muestra en la figura 2 y como lo dice la Federación Española de municipios y provincias³¹, actúa de la siguiente manera: la radiación solar entra y calienta la superficie terrestre al absorber un porcentaje de ésta, después la energía es emitida hacia la atmósfera donde los GEI retienen parte de ella y las re-emiten a la superficie causando que se caliente de nuevo.

³⁰ DURKIN, Martin. La gran farsa del calentamiento global. [documental]. Reino Unido, 2007. 75 minutos.

³¹ FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit., p.11

Figura 3. Efecto invernadero y calentamiento global



Fuente: ALBRITTON, Daniel y MEIRA-FILHO, L. Gylvan. *Climate Change 2001: The Scientific Basis-Technical Summary*. En: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE. 881p.

2.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los gases de efecto invernadero (GEI), son los que se encuentran en la atmósfera de origen natural y antropogénico, causan el efecto invernadero; los más importantes de estos son, de acuerdo a Badii³²: el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃). Tienen la capacidad de absorber la radiación; el dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales junto con el vapor de agua, acorde a Barros³³, estos tienen un tiempo de vida que se extiende entre los 15-150 años; el del CO₂ se calcula que se encuentra entre los 100 y 150 años, esa permanencia tan larga hace que el efecto sea acumulativo, dificultando su reducción, a pesar de que el tiempo medio de su remoción es de cuatro años.

Dependiendo de la concentración, de las características del gas y de la atmósfera, el tiempo de retención del GEI es establecido, por ejemplo, la concentración actual en la atmósfera de un GEI es el resultado neto de sus emisiones y eliminaciones pasadas de la atmósfera. Los gases de efecto invernadero de larga vida, como lo son el CO₂, el CH₄ y el N₂O, son químicamente estables y permanecen durante

³² BADI, M. H; GUILLEN, O. Lugo y SÁNCHEZ, H. J. Op. Cit., p. 182.

³³ BARROS, Vicente. *Cambio climático global ¿Cuántas catástrofes antes de actuar?*. 2 ed. Buenos Aires. Libros del Zorzal, 2006. 179 p. ISBN: 987-1081-88-X.

décadas hasta siglos o más. Debido a ello y según Solomon³⁴, estos gases se mezclan bien en la atmósfera más rápido de lo que se eliminan; y el CO₂ no tiene un período específico de vida porque está en ciclo continuo con la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre.

Una consecuencia de los GEI es el efecto invernadero, como establece el IDEAM³⁵, es un fenómeno por el cual los gases que tiene la atmósfera, retienen el calor emitido por la tierra, es la principal causa del calentamiento global. Los principales gases de este fenómeno son el H₂O y el CO₂; cabe resaltar que sin este efecto, la temperatura promedio de la superficie terrestre estaría por debajo del punto de congelamiento del agua, lo que haría que la vida en la misma fuera nula, por ende, se entiende que el efecto natural es beneficioso para la existencia, pero las actividades humanas intensifican el proceso trayendo malas consecuencias al producir los GEI en una tasa mayor a la que la biósfera y océanos pueden asimilar.

El dióxido de carbono según establece Green Facts³⁶ es un gas incoloro, inodoro e incombustible, se genera cuando se quema cualquier sustancia que contenga carbono, es también un producto de la respiración y fermentación. No es reactivo en la atmósfera y tiene un tiempo de residencia relativamente largo; Folger³⁷ dice que aproximadamente el 50% del CO₂ se eliminará en 30 años, el 30% en unos siglos y el 20% restante puede perdurar en durante miles de años. La mayor parte de este gas la absorben los océanos o lo utilizan las plantas para la fotosíntesis, aun así, se genera mayor cantidad de la que se puede absorber o utilizar. Como manifiesta Brown³⁸, según modelos realizados en computadoras se predice un aumento en la temperatura global de entre 1-3°C y se prevé que el nivel de CO₂ atmosférico se duplique entre los años 2050 y 2100.

El CO₂ supone el 70% de los GEI, proviene principalmente de procesos industriales donde se utilizan combustibles fósiles y por medios de transporte; “(...)

³⁴ SOLOMON, Susan; QIN, Dahe y MANNING, Martin. Gases de efecto invernadero. [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html

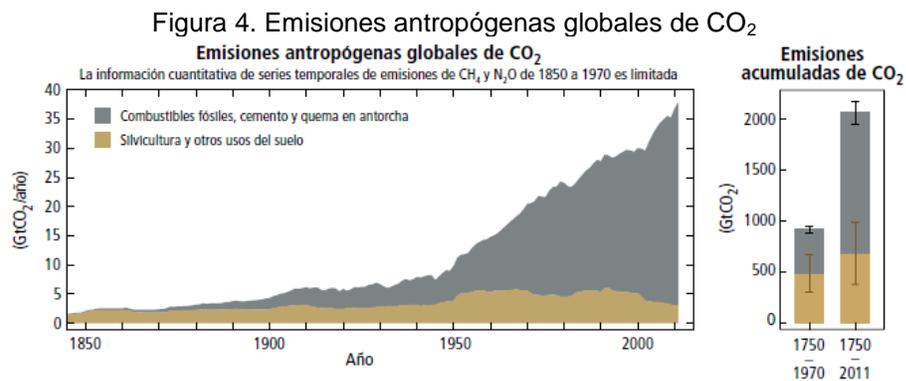
³⁵ IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia. Bogotá, 2015. p. 5. ISBN: 978-8902-94-4.

³⁶ GREEN FACTS. Dióxido de carbono (CO₂). [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/dioxido-carbono.htm>

³⁷ FOLGER, Peter. The carbon cycle: Implications for climate change and congress. En: Carbon capture and storage including coal-fired power plants. Washington D.C, 2009. p. 99-111. ISBN: 978-1-60741-196-3.

³⁸ BROWN, Theodore, *et al.* Química, la ciencia central. 11ed. México: Pearson, 2009. p. 782. ISBN: 978-607-442-012-0.

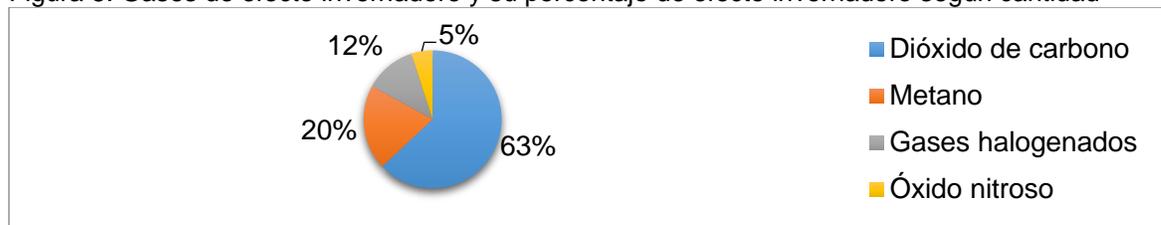
a finales del siglo XIX, los niveles de CO₂ eran de 280 partes por millón (ppm); ahora están alrededor de 380 ppm. Si esa cantidad supera las 450 ppm, la temperatura de la Tierra podría dispararse de manera descontrolada³⁹. Para hacer más claro lo anterior, en la figura 4 se evidencia que las emisiones antropógenas de CO₂ provenientes de combustibles fósiles y cemento han aumentado en gran medida desde el año 1970, específicamente, en un 78% hasta el 2010. Aunándole a ello, el IPCC⁴⁰ informa que aproximadamente el 40% de esas emisiones permanecen en la atmósfera, el resto ha sido removido por sumideros y reservorios naturales de carbono.



Fuente: GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. p.48.

El CO₂ se libera por procesos naturales tales como la respiración, erupciones volcánicas, deforestación, cambio en el uso de suelos como se muestra en la figura 4; además, éste gas aunque es el que menos potencial de calentamiento atmosférico tiene frente a los demás GEI, la cantidad emitida del mismo es mayor a los demás, lo que hace que el porcentaje debido a este gas sea el principal a tener en cuenta, lo anterior se puede observar en la figura 5 que se encuentra a continuación.

Figura 5. Gases de efecto invernadero y su porcentaje de efecto invernadero según cantidad



Nota: Elaboración propia. Información fue tomada de ROMEO, Luis, *et al.* Captura y almacenamiento de CO₂. Vol. 176. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. p. 11. ISBN: 978-84-92521-69-2.

³⁹ OCEANA. Gases de Efecto Invernadero. [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: <http://eu.oceana.org/es/node/46897>

⁴⁰ IPCC, Op. Cit., p. 47

Uno de los indicadores, para medir el fenómeno del calentamiento global, según Badii⁴¹ es con los gases de efecto invernadero (GEI), según su impacto ambiental, su capacidad de absorber calor y su tiempo de vida en la atmósfera. Otro concepto que se puede tomar como indicador es el de huella de carbono, ya que permite identificar maneras de controlar, reducir o mitigar las emisiones y su impacto; ésta se define como “(...) la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios de los seres humanos”⁴². En la literatura se encuentra que se centran en el CO₂ en cuanto al peso de GEI por persona o por alguna actividad, es por ello, que la huella de carbono se refiere, en otras palabras, a la cantidad en toneladas o kilos de dióxido de carbono equivalente de gases de efecto invernadero que se producen en un periodo de tiempo, por ejemplo, (GtCO₂-eq/año) como se observan las unidades en las figuras 1 y 4.

Para calcular el carbono equivalente se necesita conocer la masa del gas para multiplicarla por el potencial de calentamiento mundial (PCM). Éste último es una medida para comparar el impacto climático potencial de las emisiones de los GEI de larga vida por un periodo de tiempo específico, con una emisión de pulso de una unidad de masa, es decir, así como Solomon⁴³ define, es el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kilogramo de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radiativos de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera. En la tabla 1 se encuentran los gases junto con su fórmula química, la vida en años, la eficacia radiativa que es el cambio en el flujo de la energía radiativa hacia la superficie del planeta, como resultado de cambios en la composición de la atmósfera o de aportes externos de energía solar; y el potencial de calentamiento mundial, es decir, según lo estipula Green Facts⁴⁴, la energía absorbida por unidad de concentración.

⁴¹ BADI, M. H; GUILLEN, O. Lugo y SÁNCHEZ, H. J. Op. Cit., p. 184.

⁴² SCHNEIDER, Heloísa y SAMANIEGO, Joseluis. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. En: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile: 2009, p. 5.

⁴³ SOLOMON, Susan; QIN, Dahe y MANNING, Martin. Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento. [En línea]. [29 enero de 2017] disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html

⁴⁴ GREEN FACTS. Forzamiento radiativo. [En línea]. [29 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/forzamiento-radiativo.htm>

Tabla 1. Vida, eficacia radiativa y potenciales de calentamiento mundial directo (excepto el CH₄) relacionados con el CO₂

| Nombre Industrial o común (años) | Fórmula química | Vida (años) | Eficacia Radiativa (W m ⁻² ppb ⁻¹) | Potencial de calentamiento mundial para Tiempo dado de Horizonte | | | |
|--|---|-------------------------|---|--|---------|----------|----------|
| | | | | SIE [±] (100-años) | 20-años | 100-años | 500-años |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | Ver debajo ^a | ^b 1.4x10 ⁻⁵ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Metano ^c | CH ₄ | 12 ^c | 3.7x10 ⁻⁴ | 21 | 72 | 25 | 7.6 |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 114 | 3.03x10 ⁻³ | 310 | 289 | 298 | 153 |
| <i>Sustancias controladas por el Protocolo de Montreal</i> | | | | | | | |
| CFC-11 | CCl ₃ F | 45 | 0.25 | 3,800 | 6,730 | 4,750 | 1,620 |
| CFC-12 | CCl ₂ F ₂ | 100 | 0.32 | 8,100 | 11,000 | 10,900 | 5,200 |
| CFC-13 | CCIF ₃ | 640 | 0.25 | | 10,800 | 14,400 | 16,400 |
| CFC-113 | CCl ₂ FCCIF ₂ | 85 | 0.3 | 4,800 | 6,540 | 6,130 | 2,700 |
| CFC-114 | CCIF ₂ CCIF ₂ | 300 | 0.31 | | 8,040 | 10,000 | 8,730 |
| CFC-115 | CCIF ₂ CF ₃ | 1,700 | 0.18 | | 5,310 | 7,370 | 9,990 |
| Halon-1301 | CBrF ₃ | 65 | 0.32 | 5,400 | 8,480 | 7,140 | 2,760 |
| Halon-1211 | CBrClF ₂ | 16 | 0.3 | | 4,750 | 1,890 | 575 |
| Halon-2402 | CBrF ₂ CBrF ₂ | 20 | 0.33 | | 3,680 | 1,640 | 503 |
| Tetracloruro de carbón | CCl ₄ | 26 | 0.13 | 1,400 | 2,700 | 1,400 | 435 |
| Bromuro de metilo | CH ₃ Br | 0.7 | 0.01 | | 17 | 5 | 1 |
| Cloroformo de metilo | CH ₃ CCl ₃ | 5 | 0.06 | | 506 | 146 | 45 |
| HCFC-22 | CHClF ₂ | 12 | 0.2 | 1,500 | 5,160 | 1,810 | 549 |
| HCFC-123 | CHCl ₂ CF ₃ | 1.3 | 0.14 | 90 | 273 | 77 | 24 |
| HCFC-124 | CHClFCF ₃ | 5.8 | 0.22 | 470 | 2,070 | 609 | 185 |
| HCFC-141b | CH ₃ CCl ₂ F | 9.3 | 0.14 | | 2,250 | 725 | 220 |
| HCFC-142b | CH ₃ CCIF ₂ | 17.9 | 0.2 | 1,800 | 5,490 | 2,310 | 705 |
| HCFC-225ca | CHCl ₂ CF ₂ CF ₃ | 1.9 | 0.2 | | 429 | 122 | 37 |
| HCFC-225cb | CHClFCF ₂ CCIF ₂ | 5.8 | 0.32 | | 2,030 | 595 | 181 |
| <i>Hidrofluorocarbonos</i> | | | | | | | |
| HFC-23 | CHF ₃ | 270 | 0.19 | 11,700 | 12,000 | 14,800 | 12,200 |
| HFC-32 | CH ₂ F ₂ | 4.9 | 0.11 | 650 | 2,330 | 675 | 205 |
| HFC-125 | CHF ₂ CF ₃ | 29 | 0.23 | 2,800 | 6,350 | 3,500 | 1,100 |
| HFC-134a | CH ₂ FCF ₃ | 14 | 0.16 | 1,300 | 3,830 | 1,430 | 435 |
| HFC-143a | CH ₃ CF ₃ | 52 | 0.13 | 3,800 | 5,890 | 4,470 | 1,590 |
| HFC-152a | CH ₃ CHF ₂ | 1.4 | 0.09 | 140 | 437 | 124 | 38 |
| HFC-227ea | CF ₃ CHF ₂ CF ₃ | 34.2 | 0.26 | 2,900 | 5,310 | 3,220 | 1,040 |
| HFC-236fa | CF ₃ CH ₂ CF ₃ | 240 | 0.28 | 6,300 | 8,100 | 9,810 | 7,660 |
| HFC-245fa | CHF ₂ CH ₂ CF ₃ | 7.6 | 0.28 | | 3,380 | 1,030 | 314 |
| HFC-365mfc | CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃ | 8.6 | 0.21 | | 2,520 | 794 | 241 |
| HFC-43-10mee | CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃ | 15.9 | 0.4 | 1,300 | 4,140 | 1,640 | 500 |
| <i>Compuestos perfluorinados</i> | | | | | | | |
| Hexafluoruro de azufre | SF ₆ | 3,200 | 0.52 | 23,900 | 16,300 | 22,800 | 32,600 |
| Trifluoruro de nitrógeno | NF ₃ | 740 | 0.21 | | 12,300 | 17,200 | 20,700 |
| PFC-14 | CF ₄ | 50,000 | 0.10 | 6,500 | 5,210 | 7,390 | 11,200 |
| PFC-116 | C ₂ F ₆ | 10,000 | 0.26 | 9,200 | 8,630 | 12,200 | 18,200 |

Fuente: SOLOMON, Susan; QIN, Dahe y MANNING, Martin. Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento. [En línea]. [29 enero de 2017] disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html

2.3 SUMIDEROS DE CARBONO

En el planeta tierra, tanto la atmósfera, como en los océanos, la vegetación y los suelos, almacenan carbono; de los nombrados, según Folger⁴⁵, el océano es el que más almacena, la atmósfera contiene más carbono del que se encuentra en toda la vegetación viva. Todos se conocen como sumideros porque absorben el carbono de la atmósfera.

Como señala la CMNUCC de 1992 un sumidero de carbono es “(...) cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero”⁴⁶. Así se llega a la conclusión, que el carbono se encuentra en los océanos, reservas geológicas y la tierra, principalmente en los bosques y en los humedales; en la figura 6 se evidencia que los compartimentos nombrados anteriormente tienen un intercambio dinámico.

Figura 6. Compartimentos y flujos globales de carbono (Gt de carbono)



Fuente: IPCC, special report on renewable energy sources and climate change mitigation. 2011, citado por FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. Los sumideros de carbono a nivel local. 2011. p.19

Los sumideros, aparte de almacenar carbono, contribuyen a la mitigación del cambio climático ya que absorben parte del carbono emitido. Según Pardos⁴⁷, el contenido de carbono terrestre es menor a la décima parte del albergado en el océano. También, se refiere a un sumidero como a la existencia de un flujo neto de carbono desde la atmósfera al sistema. A medida que los sumideros acumulan más carbono, la capacidad y la velocidad de acumulación pueden cambiar.

⁴⁵ FOLGER, Peter. Op. Cit., p. 105.

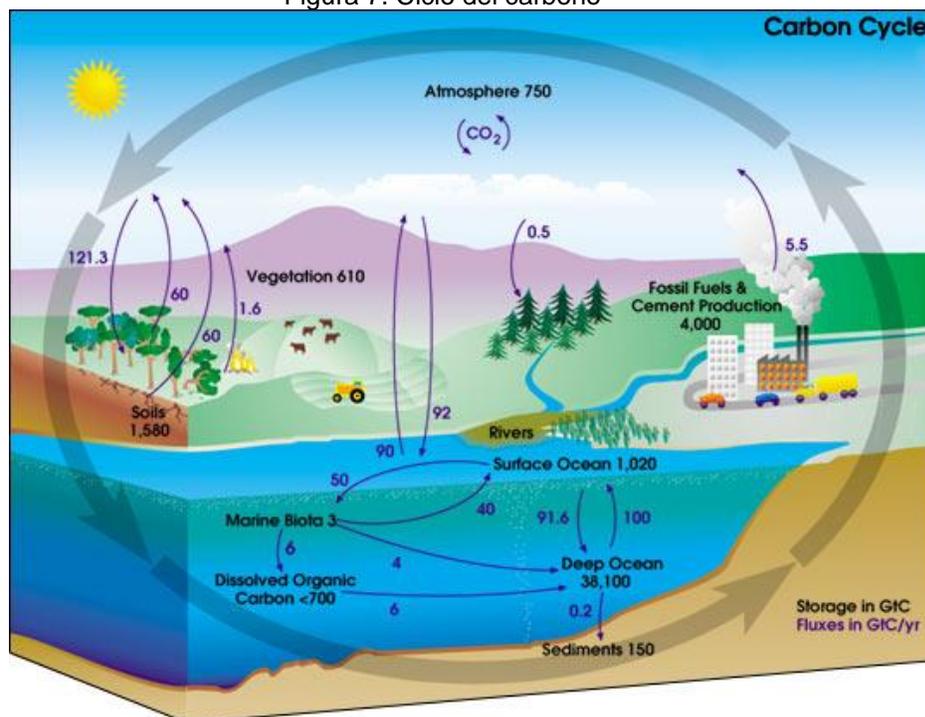
⁴⁶ FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit, p. 19.

⁴⁷ PARDOS, José. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria); 2010. p. 26. ISBN: 978-84-7498-529-0.

Para entender lo anteriormente nombrado, es necesario conocer el ciclo del carbono; éste es un ciclo biogeoquímico, ya que tiene que ver con la vida, la tierra y la química, por el cual se intercambia carbono como se puede ver en la figura 7.

Se considera que el ciclo está constituido por cuatro sumideros principales, según la página web del ciclo del carbono⁴⁸ son la atmósfera, los océanos, los sedimentos y la biosfera terrestre, la cual abarca el agua dulce y la materia orgánica no viva. Es de gran importancia el ciclo, ya que como afirma Folger⁴⁹, de él depende la producción de materia orgánica, la cual es el sustento de la vida; éste es en sí es el intercambio o flujo de carbono entre la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre. Y de los anteriores, según Laureano⁵⁰, los suelos, en la vegetación y atmósfera, la cantidad de carbono que se encuentra es alrededor de 125.000 millones de toneladas, lo que equivale a 2/5 del intercambio de carbono entre la tierra y la atmósfera.

Figura 7. Ciclo del carbono



Fuente: CICLO DEL CARBONO. [En línea]. [8 febrero de 2017] disponible en: <http://www.ciclodelfcarbono.com/>

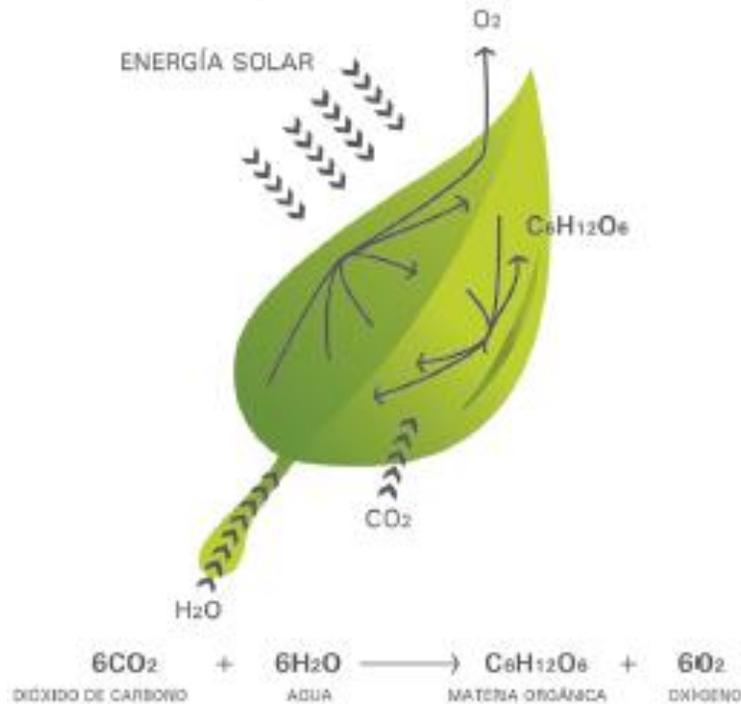
⁴⁸ CICLO DEL CARBONO. [En línea]. [6 febrero de 2017] disponible en: <http://www.ciclodelfcarbono.com/>

⁴⁹ FOLGER, Peter. Op. Cit., p. 102.

⁵⁰ LAUREANO, Raquel; FERNÁNDEZ, María y LEDESMA, Juan. Inventario de sumideros de carbono de Extremadura. Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente. Junta de Extremadura ed. INDUGRAFIC, artes gráficas, S.L., 2010. 200p. ISBN: 978-84-606-4881-9.

Aparte de los bosques y del océano, los humedales sin importar que sólo ocupan entre el 4-6% de la superficie terrestre, también desempeñan su papel como sumideros, principalmente sucede con las plantas que fijan el CO₂ de la atmósfera y lo transforman a carbono orgánico mediante la fotosíntesis como se observa en la figura 8. Según Hernández⁵¹, la acumulación de carbono se realiza en la biomasa vegetal y en los suelos. Hay que tener en cuenta que si el balance neto de los flujos de carbono, secuestro, emisiones, resulta positivo, el ecosistema está actuando como un sumidero, en el caso contrario, actuaría como una fuente de carbono.

Figura 8. El proceso de fotosíntesis



Fuente: FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. Los sumideros de carbono a nivel local. 2011. p. 20.

La fotosíntesis es el principal proceso natural por el cual se secuestra, captura carbono; éste se distribuye entre la biomasa vegetal viva (tronco, ramas, hojas), biomasa muerta (madera, raíces secas, hojas muertas, hojarasca y materia orgánica en descomposición) y el suelo. El carbono que se encuentra en los sitios anteriormente nombrados, como lo dice la Federación Española de municipios y provincias⁵², puede liberar de forma natural por procesos de respiración y por actividad del suelo; además por incendios forestales, enfermedades y plagas se

⁵¹ HERNÁNDEZ, María. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *En: Terra Latinoamericana*. Vol. 28.; No. 2. 2010; p. 139-147.

⁵² FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit, p. 20.

acelera la liberación del carbono a la atmósfera. En el planeta tierra los sumideros de carbono naturales se encuentran en diferentes ecosistemas y lugares como lo son los océanos, la tundra, los bosques, los pastizales y los humedales, entre otros; a continuación se explicarán cada uno de ellos.

Los océanos tienen gran importancia como sumideros de carbono, tanto en la parte orgánica como en la inorgánica, Trumper⁵³ dice que es el segundo sumidero más grande después de la atmósfera. A medida que la concentración de CO₂ aumenta, el océano lo absorbe más. Razón por la cual, Folger⁵⁴ estipula que han absorbido alrededor de 30% de esas emisiones antropogénicas desde la industrialización. Como el CO₂ ha estado aumentando la acidez de las aguas superficiales, ya que este reacciona al entrar al océano y produce ácido carbónico, lo anterior puede llegar a afectar la vida marina.

La tundra es una región de los polos, fría, sin árboles, sin animales que cavan madrigueras, con *permafrost*, la BBC⁵⁵ lo define como la capa de suelo que permanece a una temperatura de 0°C por lo menos durante dos años. Como informa National Geographic⁵⁶, ocupa una décima parte de la superficie terrestre y alberga un tercio del carbono secuestrado en el suelo; por lo tanto, es motivo de preocupación que si el calentamiento global derrite estas regiones, el carbono contenido empieza a liberarse.

Según Pardos⁵⁷, los bosques cubren aproximadamente el 27% de la superficie terrestre, contienen el 77% de la biomasa viva y el 80% del carbono que la vegetación y suelos intercambian con la atmósfera se encuentra ubicado allí. El potencial de secuestro de carbono depende del contenido inicial del mismo, de las tasas de crecimiento, de la edad, del clima y de la capacidad biológica. Su área mundial está disminuyendo aproximadamente entre 12-15 millones de hectáreas anualmente, como comunica Kanninen⁵⁸, aparte de ello, cuando los bosques están maduros, es decir, cuando tienen edades mayores a los 80-100 años y menores a

⁵³ TRUMPER, Kate, *et al.* ¿La solución natural? el papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático, evaluación rápida del PNUMA. UNEP-WCMC. 2009. p. 34.

⁵⁴ FOLGER, Peter. Op. Cit., p. 105.

⁵⁵ BBC. Nature wildlife, Tundra. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://www.bbc.co.uk/nature/habitats/Tundra>

⁵⁶ NATIONAL GEOGRAPHIC. Amenazas para la tundra. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://nationalgeographic.es/medio-ambiente/habitats/amenazas-tundra>

⁵⁷ PARDOS, José. Op. Cit., p. 31.

⁵⁸ KANNINEN, Markku. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s09.htm>

180-200 años, no ocurre asimilación neta de carbono, ya que el ecosistema está saturado con este elemento.

Hay diferentes clases de bosques, se encuentran los tropicales, los boreales y los templados los cuales explica Trumper⁵⁹, tales como:

- Los bosques tropicales son los que contienen la mayor reserva de carbono terrestre, se encuentran en el centro y norte de América del Sur, Oeste de África, sureste de Asia y el noreste de Australia, principalmente cerca al ecuador; suelen ser húmedos con alta biodiversidad y con temperatura y luz constante. Éstos absorben aproximadamente el 15% de las emisiones antropogénicas totales.
- Los bosques boreales o taigas los cuales se encuentran a lo largo de Canadá, Rusia, Alaska y Escandinavia, en temperaturas templadas y frías, lugares húmedos, están formados por especies de pinos resistentes al frío; contienen la segunda reserva de carbono más grande, la mayoría se encuentra almacenada en el suelo y la hojarasca.
- Los bosques templados, como dice su nombre, se encuentra en zonas de clima templado como lo es América del norte, Europa y Asia, cuenta con las cuatro estaciones bien diferenciadas, tienen diversidad en fauna y flora; son sumideros activos pero la deforestación es un gran problema en esta zona. En su suelo se acumula menos carbono que en los bosques boreales o en la tundra.

Los pastizales funcionan como un ecosistema de sucesión temprana, se encuentran principalmente en América del Sur, Estados Unidos y Asia central. Acorde con Trumper⁶⁰, en estas zonas no hay abundancia de agua ni de nutrientes, el crecimiento de las plantas está limitado. Los animales de pastoreo cumplen una función la cual es acelerar el ciclo del carbono al comer la biomasa y convertirla en estiércol, lo que es más fácil de descomponer.

Los humedales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, suelen estar en inundación temporal o permanente; se encuentran en hábitats continentales, costeros y marinos los cuales tienen características climáticas y geológicas en común. Son de gran importancia para el ciclo del carbono, para la biodiversidad, la producción de alimentos, entre otras cosas; se componen de tres elementos principales según Hernández⁶¹: primero, el suelo hídrico, el cual está

⁵⁹ TRUMPER, *et al.* Op. Cit., 25-31.

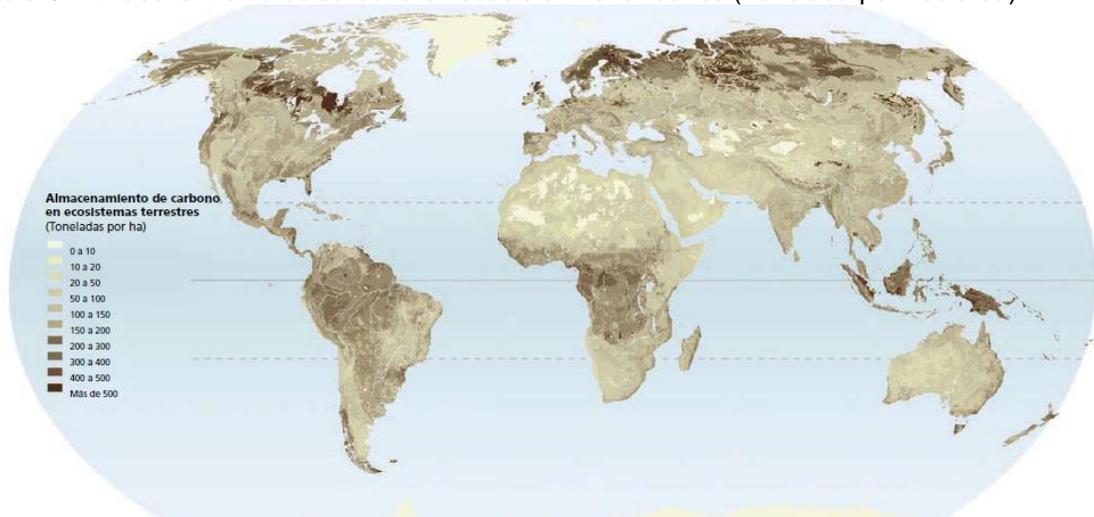
⁶⁰ *Ibíd.*, p. 27.

⁶¹ HERNÁNDEZ, María. Op. Cit., p. 140-141.

formado bajo condiciones de inundaciones por un periodo de tiempo determinado, segundo, las macrófitas o hidrófitas, las cuales son plantas acuáticas adaptadas para vivir en suelos inundados o en el agua en sí y tercero, el agua.

Los ecosistemas terrestres almacenan casi el triple del carbono que se encuentra en la atmósfera, mayormente en los bosques tropicales y boreales. De acuerdo con Trumper⁶², en la figura 9 se puede observar la distribución del carbono en el planeta tierra, se muestra que las mayores cantidades se almacenan en los trópicos y en las latitudes elevadas, donde el suelo permanece congelado.

Figura 9. Almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres (Tonelada por hectárea)



Fuente: TRUMPER, Kate, *et al.* ¿La solución natural? el papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático, evaluación rápida del PNUMA. UNEP-WCMC. 2009. p. 11.

2.4 MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Para ayudar a mitigar el calentamiento global, es decir, según la FAO⁶³, para estabilizar o reducir la concentración de GEI en la atmósfera, es necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano o ayudarlo a la naturaleza a aumentar su capacidad de absorberlos. La mitigación hace referencia a las políticas, las tecnologías, a mejorar los sumideros, las medidas para limitar y reducir las emisiones; así mismo otra meta a lograr es la de la adaptación la cual consiste en “(...) el ajuste de los sistemas humanos o naturales frente a entornos

⁶² TRUMPER, *et al.* Op. Cit., 30-31.

⁶³ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). El cambio climático y los bosques. En: Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales. No. 172. Roma, 2013. p. 7-11 .E-ISBN: 978-92-307832-5.

nuevos o cambiantes. La adaptación implica ajustarse al clima, descartando, el hecho de si es por cambio climático, variabilidad climática o eventos puntuales”⁶⁴.

Debido a que reducir el incremento de las concentraciones de CO₂ a nivel mundial es complicado; la remoción de CO₂ de la atmósfera es uno de los fines que se buscan, es ahí donde la geoingeniería entra a jugar, ésta se define como “(...) la manipulación intencional a gran escala del medio ambiente de nuestro planeta para combatir el cambio climático, resultado de la actividad humana”⁶⁵.

Como una meta para la mitigación es la de estabilizar o reducir la cantidad de carbono en la atmosfera, ello se puede lograr de dos maneras: al reducir la tasa de emisión y/o aumentando la tasa de absorción, esta última se logra de forma mecánica o biológica. *La mecánica se refiere a la captura y almacenamiento de carbono (CAC)* y la biológica la cual se encuentra en los sumideros naturales nombrados anteriormente, de acuerdo con Trumper⁶⁶, para darle más fuerza; una de las ideas a hacer es la de proteger los sumideros existentes y reducir la tasa de pérdida actual, rehabilitar los ecosistemas y los suelos; y crear unos nuevos impulsando a un mayor almacenamiento de carbono en áreas que hoy tienen poco, por ejemplo, mediante la reforestación. El PNUMA⁶⁷ propone otras acciones que se pueden realizar al diseñar, comprar y usar diferentes elementos, pero para ello se necesita de una toma de conciencia respecto al tema del cambio climático.

La adaptación es otra respuesta aparte de la mitigación ante el cambio climático, según la FAO⁶⁸, la primera se encarga de los impactos y la segunda de las causas. Existen diferentes acciones para la adaptación, éstas consisten en desarrollar la capacidad para moderar los impactos al crear ciertas defensas contra ellos; hay preventivas y reactivas para sistemas naturales y humanos;

⁶⁴ CENTRO INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DEL FENÓMENO DEL NIÑO (CIIFEN). Adaptación y mitigación frente al cambio climático. [En línea]. [7 febrero de 2017] disponible en: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=102&Itemid=341&lang=es

⁶⁵ THE ROYAL SOCIETY. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. London, 2009. p. 77. ISBN: 978-0-85403-773-5.

⁶⁶ TRUMPER, *et al.* Op. Cit., 55.

⁶⁷ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. *Manual de ciudadanía ambiental global: Cambio climático. Proyecto ciudadanía ambiental global*. México D.F, 2005. 33p. ISBN: 968-7913-38-X.

⁶⁸ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). *Adaptación y mitigación al cambio climático*. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/climate-change-adaptation-and-mitigation/basic-knowledge/es/>

según se encuentra en la página de riesgo y cambio climático⁶⁹, se encuentran tomar medidas de prevención y precaución, desarrollo de investigación e información, criterio de flexibilidad en el desarrollo de actividades productivas, ubicaciones más seguras de instalaciones y obras de infraestructura, restauración de la cubierta arbórea, humedales y pastizales, establecimiento de planes de evacuación y sistemas de respuesta médica; para realizarlas, acorde al PNUMA⁷⁰, se necesitan avances tecnológicos y recursos financieros, intercambio de información, educación y concientización, legislación eficiente y planificación a mediano y largo plazo.

Para ayudar a conservar los sumideros existentes, en el protocolo de Kyoto hay tres mecanismos para la reducción de emisiones de GEI, los cuales se miden en toneladas de CO₂ equivalente como se explicó anteriormente en la sección de gases de efecto invernadero, esas toneladas se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER), éstos son según Ecoeficiencia⁷¹, una clase de bono de carbono los cuales tienen el fin de que las empresas “paguen” por contaminar, esas empresas usualmente son de origen de países industrializados y pagan a países en vía de desarrollo para compensar las cantidades de GEI que no reducen.

El mercado de carbono se da de dos maneras diferentes según dice Seeberg⁷², de cumplimiento regulado y voluntario; el primero, es utilizado por empresas y gobiernos que tienen usarlos por ley, en cambio el voluntario como lo dice el nombre, no es de carácter obligatorio y lo realizan las empresas o personas que desean reducir su huella de carbono; la institución encargada de entregar los bonos son las Naciones Unidas.

Aunque se contribuya con la reforestación y con los bonos de carbono, hay un inconveniente en confiar en los sumideros como solución a la mitigación del calentamiento global, ya que por la actividad del ser humano, estos corren peligro. Hay evidencia científica que según Rosas⁷³, prueba que distintos factores afectan el debido funcionamiento de los sumideros, es por ello que es necesario tomar

⁶⁹ RIESGO Y CAMBIOCLIMÁTICO. Adaptación y mitigación. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.riesgoycambioclimatico.org/adapymitigacion.html>

⁷⁰ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. Op. Cit., 27.

⁷¹ ECOEFICIENCIA. Bonos de carbono, ¿qué son y cómo funcionan?. [En línea]. [7 febrero de 2017] disponible en: <http://ecoefficiencia.com.co/bonos-de-carbono-que-son-como-funcionan/>

⁷² SEEBERG, Christina. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Roma: FAO, 2010. 39p.

⁷³ ROSAS, Carlos. Op. Cit., p. 2.

medidas más que todo en los países industrializados los cuales generan la mayor cantidad de gases de efecto invernadero. Razón por la cual, se requiere de innovación en tecnologías, hay unas las cuales se han creado, que están en fase de experimentación y si llega a funcionar, se llevaría a gran escala a todos los sectores industriales que emiten CO₂, entre ellas se encuentra la CAC, que es la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂).

2.5 CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ (CAC)

La CAC de CO₂ (captura y almacenamiento de carbono) se ha reconocido como una pieza clave para la reducción de las emisiones, razón por la cual, la Unión Europea desde el año 2009 decidió financiar seis proyectos para su demostración en el sector eléctrico; además de éste Muñoz⁷⁴ publica información en la que se ha evidenciado el incremento de demanda de materiales para construcción como lo es el cemento, cuya producción es una gran fuente de emisiones, por lo que se evalúa la utilización de la CAC para este sector.

La reducción de emisiones de CO₂ de carácter antropogénico es necesaria para evitar que la temperatura global siga incrementando, como la meta es reducirla 2°C, se necesita que las emisiones anuales bajen de las 10GtC/año actuales a 5-6GtC/año para el año 2050. Se tiene la opción de realizar una transición a energías renovables o la utilización de la tecnología CAC; según Ni⁷⁵, la primera requiere de una inversión inicial importante.

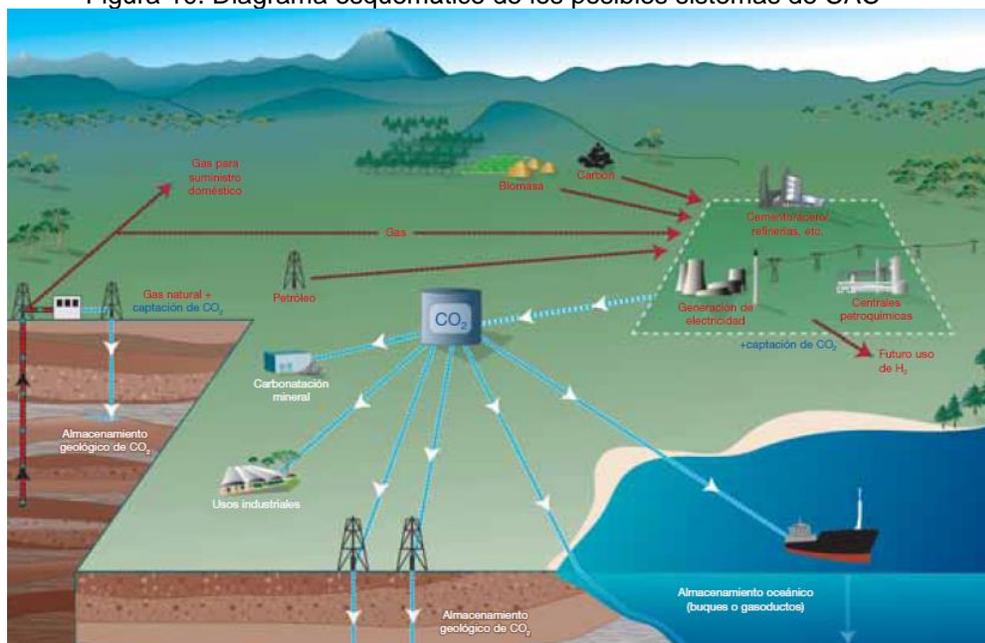
Ésta tecnología consiste según explica Sanz⁷⁶, en capturar al gas más abundante de los de efecto invernadero, el CO₂, que sea emitido de una instalación industrial, transportarlo e inyectarlo a su lugar de almacenamiento en el cual va a quedar indefinidamente, como se muestra en la figura 10, en el cual se indican las fuentes, las opciones de transporte y almacenamiento de CO₂.

⁷⁴ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 6.

⁷⁵ NI, Kunming, *et al.* The global potential for carbon capture and storage from forestry. En: Carbon Balance and Management. Vol. 11, No. 3, 2016. p. 1.

⁷⁶ SANZ, Íñigo. La captura y almacenamiento de carbono: Una novedosa técnica de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero regulada por la Unión Europea. En: Revista de la facultad de derecho PUCP. No. 70, 2013. p.165-186. ISSN: 0251-3420.

Figura 10. Diagrama esquemático de los posibles sistemas de CAC



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p.10. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

La CAC de CO₂, consta de tres fases para su desarrollo: captura, transporte y almacenamiento, a continuación se encuentra la breve explicación de cada una y en la figura 11 se encuentra el esquema correspondiente.

1. Captura:

Es la etapa donde se separa el CO₂ de la corriente de gases en la fuente de emisión, según el autor Llamas⁷⁷, se puede realizar antes, durante o después a la combustión; para la selección del tipo de captura se tiene en cuenta diferentes criterios, entre los cuales los principales son: la concentración, la presión, la temperatura, tipo de combustible empleado y volumen.

En el presente, la tecnología solo puede capturar los gases provenientes de fuentes fijas, las cuales son las que se emiten de un lugar determinado porque son las adecuadas para la captura y almacenamiento; por el momento, las de fuentes pequeñas o móviles como hogares, comercio o medios de transporte no se encuentran apropiadas para esta tecnología. Además de ello, en el 2000 de acuerdo a Green Facts⁷⁸, el 60% de las emisiones de CO₂ provenientes del uso de combustibles fósiles, fueron producidas por fuentes fijas.

⁷⁷ LLAMAS, Bernardo. Captura y almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura geológica como almacén de CO₂. Vol. 20. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva-España, 2016. p. 29. ISBN: 978-84-92679-12-6.

⁷⁸ GREENFACTS. Captura y almacenamiento de CO₂. [En línea]. [31 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/l-2/2-fuentes-dioxido-carbono.htm>

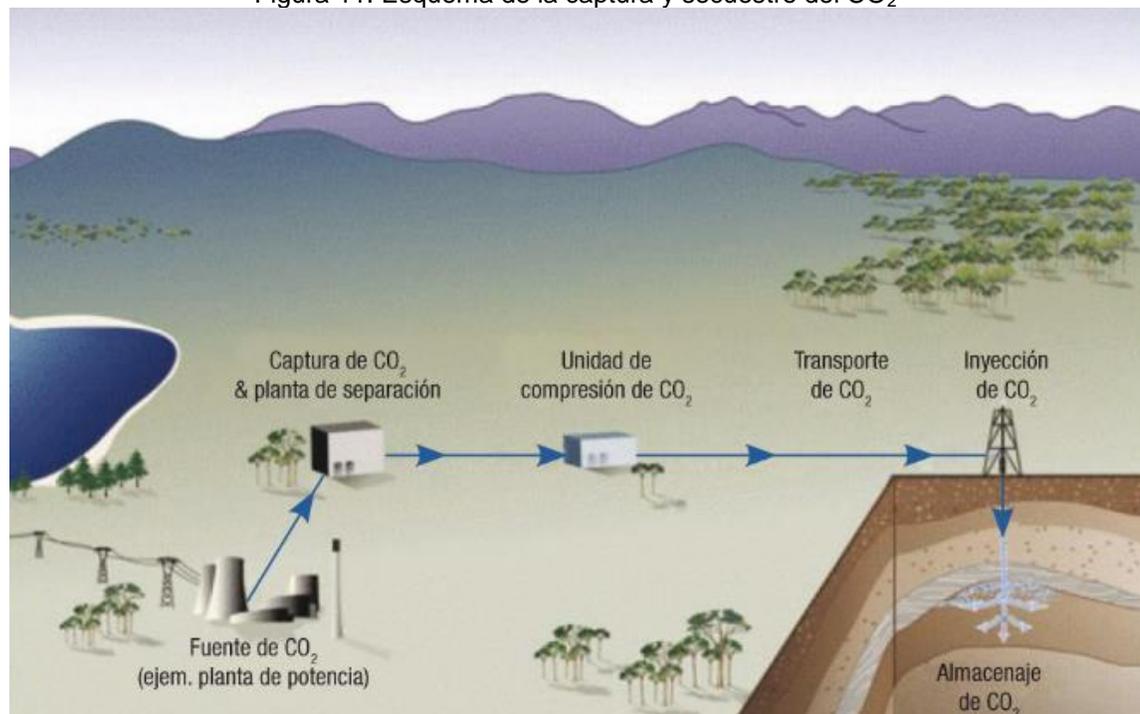
2. Transporte del CO₂ según Sanz⁷⁹:

Para esta fase es necesario que el gas sea comprimido con el fin de reducir su volumen para facilitar su transporte, también que llegue con la presión necesaria para su inyección y así lograr su respectivo almacenamiento. Se traslada por medio de tuberías o gasoductos normalmente, pero también se puede hacer en buques o camiones cisterna.

3. Almacenamiento del CO₂, consiste según Llamas⁸⁰ en:

Se realiza en la formación con las características adecuadas para su acopio, ya sea en una geológica u oceánica (se encuentra en periodo de investigación). Los principales son los yacimientos agotados de petróleo o gas, formaciones salinas profundas, capas de carbón no explotables o profundas; la inyección se realiza a más de 800 metros de profundidad.

Figura 11. Esquema de la captura y secuestro del CO₂



Fuente: BIROL, Fatih. World Energy Outlook 2010. París: International Energy Agency (IEA), 2010. ISBN: 978-92-64-08624-1.

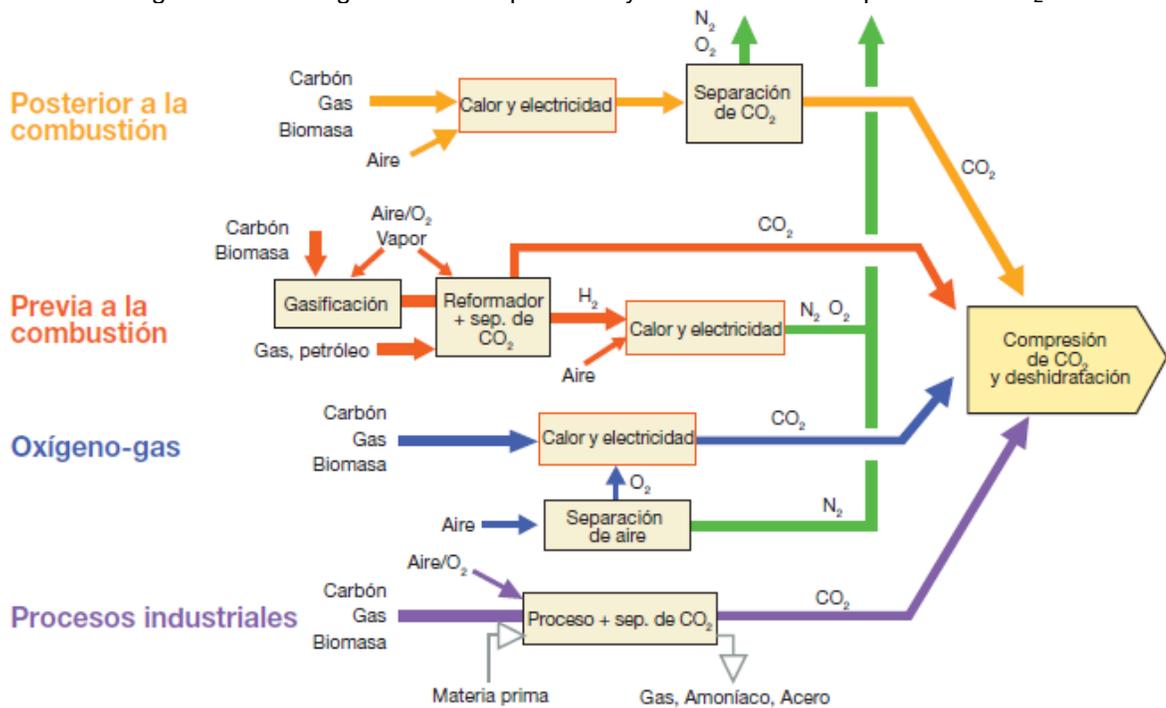
Para captar el CO₂ hay tres métodos principales según Metz⁸¹: posterior a la combustión, previo a la combustión y oxígeno-gas; en la figura 12 se encuentra la visión general de los procesos y los sistemas de captación de CO₂.

⁷⁹ SANZ, Íñigo. Op. Cit., p. 167.

⁸⁰ LLAMAS, Bernardo. Captura y almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura geológica como almacén de CO₂. Op. Cit., p. 29.

- Posterior a la combustión: Separa de los gases producidos por la combustión del combustible en el aire, normalmente se utiliza un solvente líquido.
- Previa a la combustión: Se procesa el combustible primario en un reactor con vapor de aire u oxígeno para dar como resultado una mezcla que consiste principalmente en monóxido de carbono e hidrógeno, después en un reactor de conversión se produce el hidrógeno adicional y el CO₂.
- Oxígeno-gas: Se utiliza oxígeno en lugar de aire para la combustión del combustible primario con el fin de producir un gas de combustión compuesto por vapor de agua y CO₂. Para este procedimiento se requiere separar primero el oxígeno del aire.

Figura 12. Visión general de los procesos y los sistemas de captación de CO₂



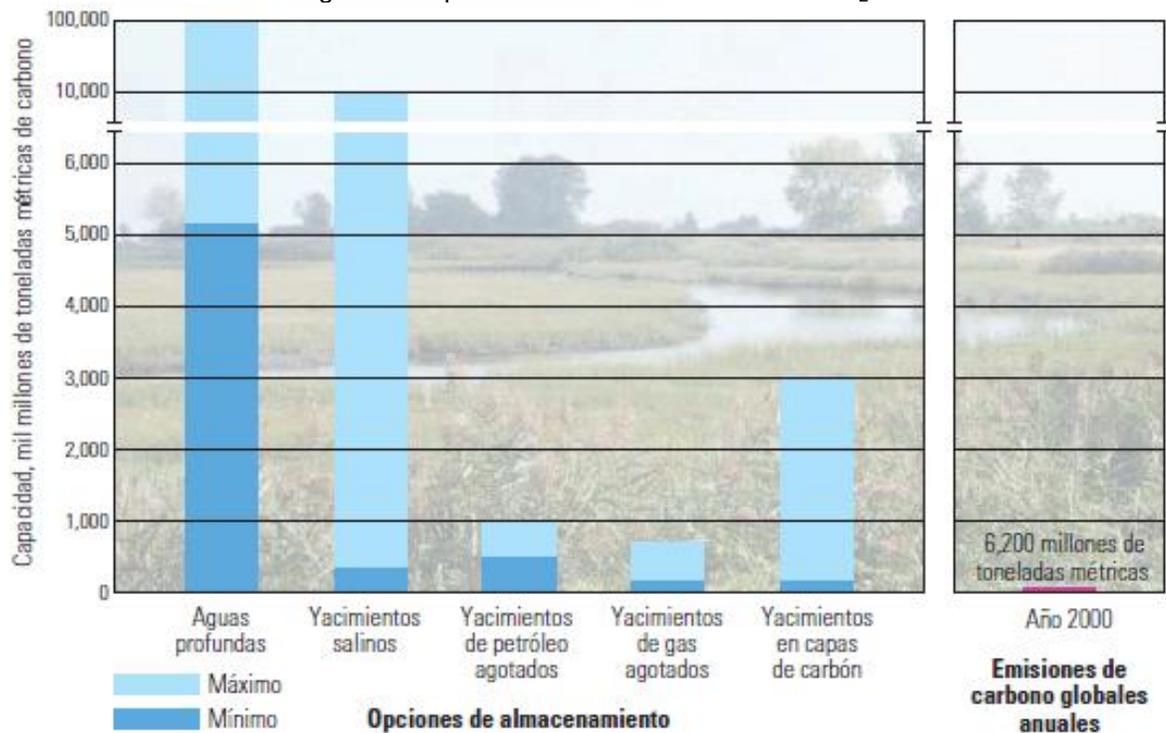
Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p.25. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

En la figura 13, se puede observar la capacidad mínima y máxima en millones de toneladas métricas de carbono que puede tolerar cada formación, evidenciándose que los océanos representan el mayor potencial de almacenamiento de carbono pero con un riesgo ambiental alto, ya que la vida marina que se encuentre próxima al punto de inyección puede sufrir diversas consecuencias, además de ello, puede haber compromiso con la acidificación del océano para lo cual se necesitarían de otras prácticas como fertilización con hierro. Por lo tanto, de acuerdo a

⁸¹ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 442p. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

Bennaceur⁸², se requiere el almacenamiento geológico avance, asimismo se necesita un mejoramiento en los sumideros naturales encontrados en los ecosistemas terrestres y océanos; haciendo que el terrestre sea el preferido por los científicos por manejar menor riesgo ambiental.

Figura 13. Opciones de almacenamiento de CO₂



Fuente: BENNACEUR, Kamel, *et al.* Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. *En:* Oilfield Review. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 52.

En EE.UU, Washington, un grupo de investigadores inyectaron CO₂ licuado a una formación de basalto la cual se forma después de que se haya enfriado la lava; dos años después, afirman que se ha solidificado en un material inerte el cual debería almacenarlo por siempre. Igualmente, la CAC no va a ser la única solución que salve el mundo tal y como se conoce; después de todo, ComputerHoy⁸³ publicó que no se va a reducir la dependencia de los recursos naturales y sólo hay una cantidad limitada de basalto en el suelo; es por ello que se hace necesaria tanto las acciones de mitigación como las de adaptación.

⁸² BENNACEUR, Kamel, *et al.* Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. *En:* Oilfield Review. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 48-65.

⁸³ COMPUTERHOY. Investigadores cada vez más cerca de la captura de carbono. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://computerhoy.com/noticias/life/investigadores-cada-vez-mas-cerca-captura-carbono-54392>

Se han planteado varios proyectos, más que todo en Europa para instalar la tecnología de CAC, la cual se ve fuertemente ligada con el precio del CO₂ en el mercado. Para que sean viables, se formularon aquellos proyectos con expectativas de 20-30 euros/tonelada, precios que no han llegado a ser reales ya que por la crisis económica mundial y por los repartos gratuitos de derechos de emisión a sectores, ha ocasionado que el precio baje a valores de 5-10 euros/tonelada. Además de lo anterior, Ecologistas en acción⁸⁴ comunica que los gobiernos no colaboran ni da incentivos, lo que ha causado que se hayan abandonado proyectos. Por otro lado la Agencia Internacional de la Energía (EIA), cree que al implementar la tecnología de CAC a instalaciones industriales, se puede reducir drásticamente las emisiones de GEI, aproximadamente un 20% y se espera alrededor del año 2050, haya 3.000 plantas con la instalación. Por su lado, National Geographic⁸⁵ informa que China está preparando proyectos piloto de mercado de carbono, los cuales tendrán un gran impacto; se esperan que sean beneficiosos para la tecnología, puesto que de ser lo contrario o que no haya cambio alguno, la implementación de la CAC no tendría un futuro muy prometedor.

Pero como la industria no puede parar, sus procesos son necesarios para el desarrollo diario de cada país; en especial los de los sectores industriales concernientes a la electricidad, al cemento y al petróleo, que generan un ingreso y beneficio a la mayoría de personas.

2.6 SECTORES INDUSTRIALES

Un sector industrial o secundario, según su clasificación entre los sectores económicos, comprende las actividades relacionadas con la transformación industrial de alimentos, mercancías y otros tipos de bienes los cuales se utilizan como base para la fabricación de nuevos. Este sector se subdivide en dos acorde el Banco de la República⁸⁶, el extractivo y el de transformación; el primero incluye la extracción minera y de petróleo, lo relacionado con la energía, y el segundo trata de la fabricación de abonos, fertilizantes, vehículos, electrodomésticos, cementos, entre otros.

⁸⁴ ECOLOGISTAS EN ACCION. Captura y almacenamiento del carbono. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.ecologistasenaccion.org/article22923.html>

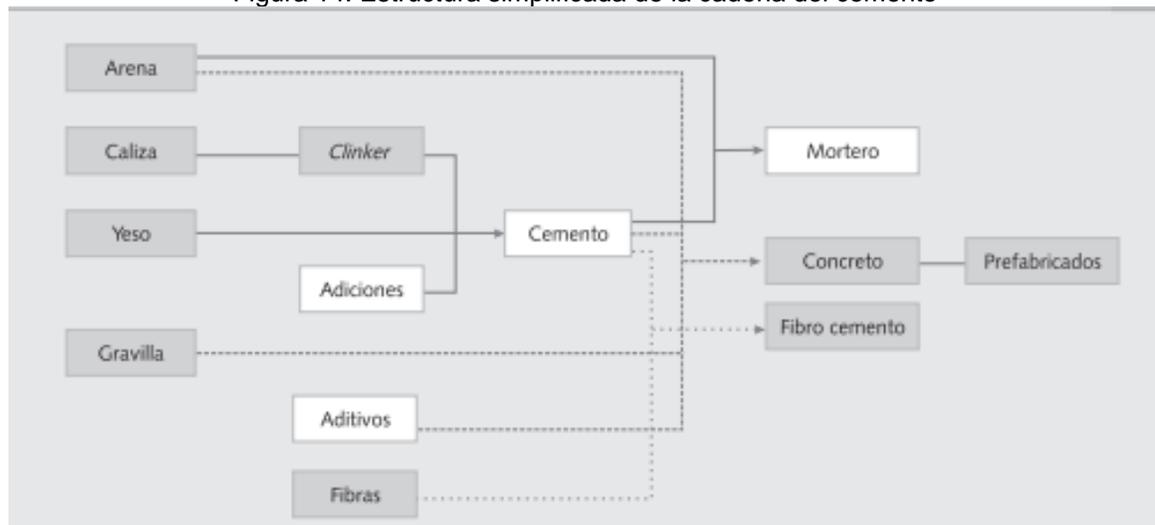
⁸⁵ NATIONAL GEOGRAPHIC. El incierto futuro de la captura y almacenamiento de carbono. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/noticias/medio-ambiente/energia/captura-almacenamiento-carbono>

⁸⁶ BANCO DE LA REPÚBLICA. Sectores económicos. [En línea]. [14 febrero de 2017] disponible en: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores_economicos

Los sectores industriales son los responsables de la gran cantidad de las emisiones de CO₂, según el autor Romeo⁸⁷, cerca de 1/3 de éstas son generadas para la producción de energía eléctrica a través de la combustión de combustibles fósiles (gas y carbón), además de ello, el procesado de minerales, en especial las cementeras y el refinado del petróleo, entre otros, que también son responsables. Para entender el por qué las anteriores son las de mayor importancia en el presente trabajo, se nombran a continuación los sectores y procesos los cuales producen CO₂.

3.6.1 Construcción, Cemento. En la cadena del cemento se encuentra la caliza, yeso, arena, gravilla, *clinker*, cemento, concreto, asbesto, fibrocemento y prefabricados como se muestra en la figura 14; de acuerdo al Departamento Nacional de Planeación⁸⁸, el cemento tiene una estrecha relación con las actividades edificadoras en la parte de construcción.

Figura 14. Estructura simplificada de la cadena del cemento



Fuente: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). Cemento y sus aplicaciones. [En línea]. [15 febrero de 2017] disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/cemento.pdf>

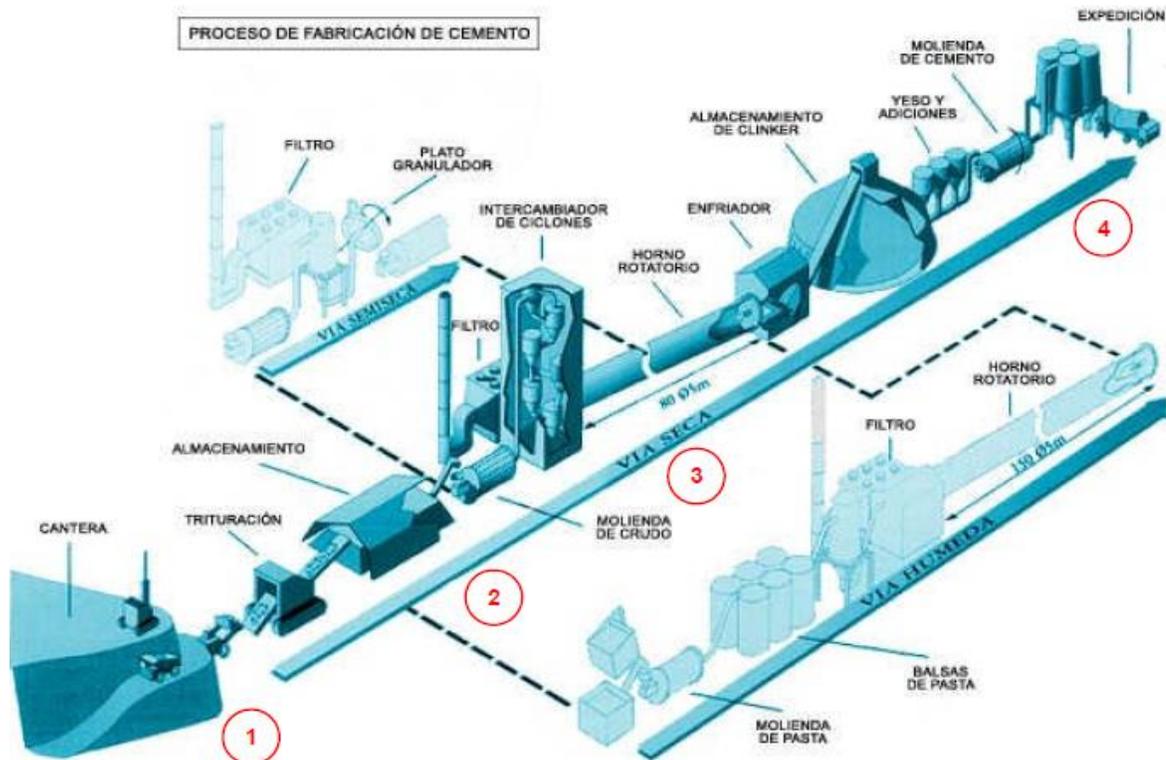
Como se evidencia en la figura 15, se encuentra el proceso de producción del cemento en cuatro fases; la primera es la extracción y molienda de materias primas, la cual la principal es la caliza, ésta es triturada y almacenada con arcilla y otros materiales, después en la segunda fase se homogeniza la materia prima la

⁸⁷ ROMEO, Luis, *et al.* Captura y almacenamiento de CO₂. Vol. 176. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. 227p. ISBN: 978-84-92521-69-2.

⁸⁸ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). Cemento y sus aplicaciones. [En línea]. [15 febrero de 2017] disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/cemento.pdf>

cual se llama crudo, luego en la tercera, se produce el *clinker* al calcinar el crudo a 1400°C y por último en la cuarta etapa, es la molienda del cemento, donde se le adiciona el yeso a lo producido en la tercera fase.

Figura 15. Proceso de fabricación de cemento



Fuente: LATORRE, Andrés. La industria del cemento en Colombia, determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005). Monografía en Ciencias Económicas–Facultad de Ciencias Económicas, Pontificia Universidad Javeriana. 2008. p. 7.

Aparte del sector de construcción, particularmente el de fabricación del cemento, según la IEA⁸⁹, el sector energético abarca procesos de producción de electricidad, calor, combustibles fósiles como lo es el petróleo, gas y carbón; es el que mayormente contribuye con las emisiones de GEI, en especial de CO₂. Razón por la cual a continuación se hace alusión a la parte de generación de energía eléctrica y a la industria petrolera.

⁸⁹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, citado por MARTÍNEZ, Isabel. Simulación del proceso de captura de CO₂ mediante los ciclos de carbonatación/calcinación de CaO integrado en plantas de producción de energía. Zaragoza, 2014, 223p. Tesis doctoral (Doctorado de Energías Renovables y Eficiencia Energética). Universidad de Zaragoza.

3.6.2 Energético, energía eléctrica. En cuanto a la generación de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles como lo es el carbón y el gas; según Harper⁹⁰, representa el 64% de los utilizados en el sector, siendo el carbón el dominante con el 40% y emitiendo la mayor cantidad de CO₂ a la atmósfera.

Existen diferentes formas de generar energía eléctrica como lo es en las termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas, solares fotovoltaicas o mareomotrices; pero el presente documento se centra en la primera, la termoeléctrica, la cual tiene lugar en centrales térmicas y genera la energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor por la quema combustibles fósiles.

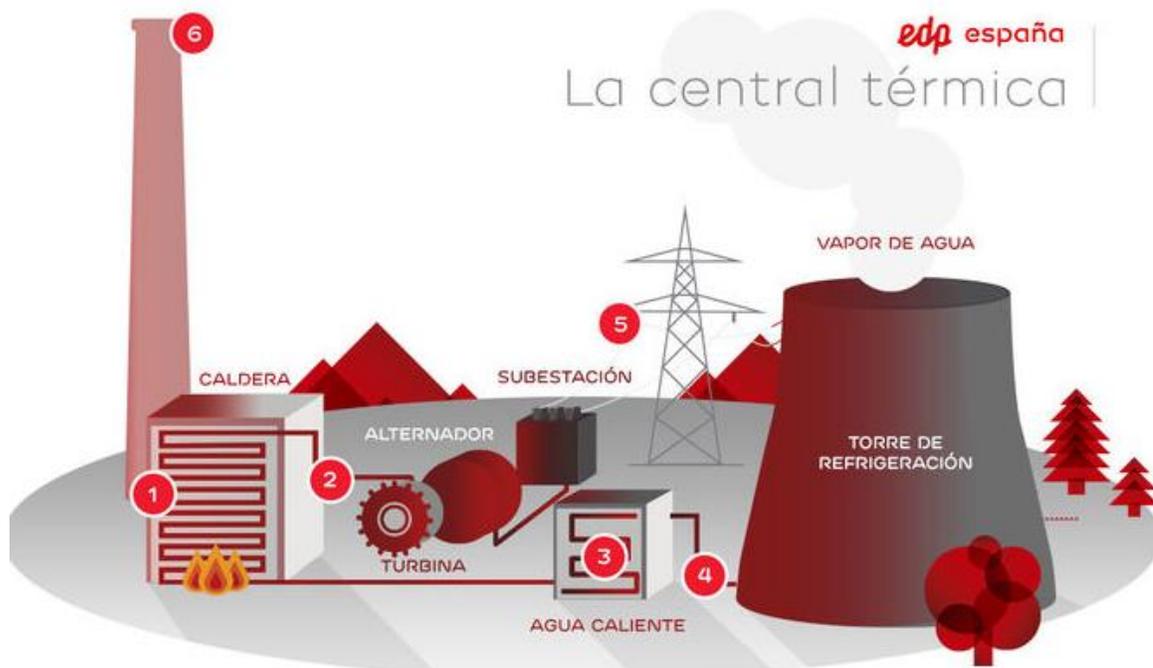
En una central térmica, la energía que posee el combustible fósil es transformada en energía calorífica en la caldera, mecánica en la turbina y eléctrica en el generador. Hay de dos tipos, de ciclo convencional y de ciclo combinado; su diferencia radica en que la combinada utiliza gas natural, gasóleo o carbón preparado para alimentar la turbina de gas, mientras que el convencional no. En la figura 16, el EDP⁹¹ muestra que el proceso tiene seis pasos, los cuales se explican a continuación:

1. Se genera la combustión del combustible fósil, ya sea gas o carbón, la cual calienta el agua que circula por la caldera y la transforma en vapor.
2. El vapor de agua producido hace girar la turbina para generar energía mecánica, la cual se convierte en energía eléctrica en el alternador.
3. El vapor se enfría en el condensador antes de volver a la caldera en forma líquida, agua, para optimizar el proceso.
4. El calor latente de la condensación del vapor, el cual es la energía requerida para cambiar de fase una sustancia, en este caso, de gas a líquido; es absorbido por el agua de refrigeración y es expulsado a través de torres de refrigeración, generando así una columna de vapor de agua.
5. La energía generada en el alternador es transformada en la subestación para elevar su tensión y así minimizar las pérdidas por las redes eléctricas.
6. Se depuran los humos, emisiones de la combustión antes de expulsarlos por la chimenea.

⁹⁰ HARPER, Gilberto. Tecnologías de generación de energía eléctrica. Limusa, 2009. 386p. ISBN: 978-60-70501-35-7.

⁹¹ EDP. ¿Cómo produce electricidad una central térmica?. [En línea]. [16 febrero de 2017] disponible en: <https://www.sostenibilidadedp.es/pages/index/proceso-de-produccion-de-una-central-termica>

Figura 16. Central térmica generadora de energía eléctrica

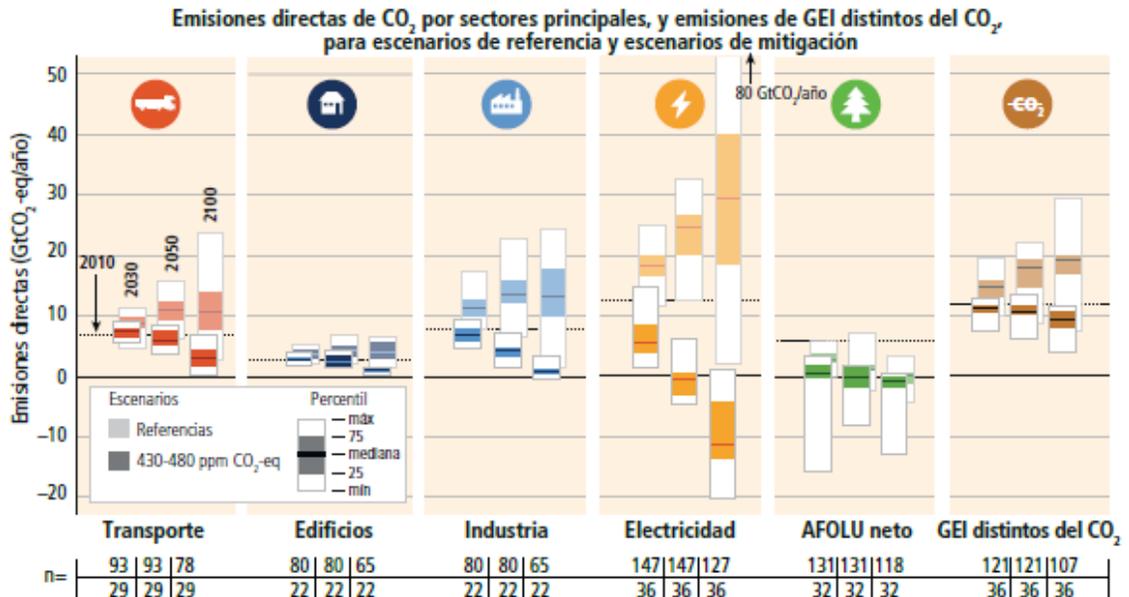


Fuente: EDP. ¿Cómo produce electricidad una central térmica?. [En línea]. [16 febrero de 2017] disponible en: <https://www.sostenibilidadedp.es/pages/index/proceso-de-produccion-de-una-central-termica>

Como se puede observar en la figura 17, la electricidad es la que más emisiones produce, seguido del transporte y la industria. Los sectores industriales emisores de CO₂, como lo es el cementero, el eléctrico y petrolero, al implementar la tecnología de CAC, además de colaborar con el medio ambiente y ayudar a la mitigación del cambio climático; encuentran otros beneficios como lo es la mejora de la eficiencia energética y optimización de procesos. Para la producción de electricidad se hace uso de combustibles fósiles, en especial del carbón; acorde con Moliner⁹², porque tiene bajos costos, precios conocidos, facilidad de almacenamiento; pero también se encuentran ciertos contras los cuales son los recursos limitados que se encuentran en algunas zonas, producción de CO₂, lo que contribuye al calentamiento global.

⁹² MOLINER, Rafael. Ecología humana y energía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). [En línea]. [30 Enero de 2017] disponible en: http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/ecologia_humana_y_energia

Figura 17. Emisiones directas de CO₂ y emisiones de GEI distintos del CO₂, para escenarios de referencia y escenarios de mitigación.



Fuente: GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. p.46.

3.6.3 Energético, petróleo. La cadena de valor de los hidrocarburos cuenta con dos áreas según la Agencia Nacional de Hidrocarburos⁹³; la upstream y la downstream, la primera es la relacionada con la exploración y producción (E&P) y la segunda tiene que ver con el refinamiento del petróleo, comercialización y distribución de los productos derivados.

En cuanto a la parte de E&P, la exploración sísmica, es el proceso por el cual ondas de energía atraviesan capas de roca para obtener una imagen representativa de las capas subterráneas; la exploración perforatoria tiene como fin de llegar hasta la capa donde posiblemente están albergados los hidrocarburos; una vez confirmada la presencia de los fluidos de interés se procede a la producción, este es el proceso mediante el cual se extrae desde la capa de roca hasta la superficie, el petróleo y gas.

En el área de downstream se encuentra la refinación, la cual consiste en transformar el petróleo en productos derivados, principalmente combustibles y petroquímicos; después sigue el transporte, el cual lleva desde la boca del pozo hasta los sitios de almacenamiento y procesamiento los productos para finalmente comercializarlos, fase donde llega a disposición del usuario lo anteriormente procesado; todo se encuentra resumido e ilustrado en la figura 18.

⁹³ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). La cadena del sector hidrocarburos. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.anh.gov.co/porta regionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>

Figura 18. Cadena de valor de los hidrocarburos



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). La cadena del sector hidrocarburos. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.anh.gov.co/portalregionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>

En los procesos previamente nombrados, emerge gas asociado a la producción de petróleo el cual se elimina de las instalaciones ya sea quemándolo o venteándolo a la atmósfera, según las restricciones que se tengan en los lugares. El venteo consiste, “(...) en el no aprovechamiento del gas proveniente de un pozo de producción de petróleo, que se quema (tipo antorcha) por motivos de seguridad”⁹⁴.

Ese procedimiento se puede dar a diferentes causas, de acuerdo a Caleta⁹⁵ es por la inexistencia de instalaciones de gasoductos, por ser pozos aislados, por ser gas con contenido de sustancias inertes y nocivas al consumo como lo son el CO₂ y el SH₂ y/o por derrochar el gas natural por el intento de aprovechar al máximo el petróleo. Cuando se realiza quema de gas, deben tenerse medidas de prevención y control de la contaminación, este proceso se da como se muestra en la figura 19, en el cual se evidencia la contaminación que provoca la quema de gases a la atmósfera.

⁹⁴ ÁVILA, Isabel. Venteo de gas. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1887-Venteo-del-gas>

⁹⁵ CALETA, Olivia. Venteo de gas. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.caletao.com.ar/eco/temreleco/10/venteo.htm>

Figura 19. Quema de gas en producción de petróleo



Fuente: LA COMUNIDAD PETROLERA. Gas: Prevén aumentar 32.7% la inversión en exploración en Bolivia, 2014. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.lacomunidadpetrolera.com/2014/02/gas-preven-aumentar-32-7-la-inversion-en-exploracion-en-bolivia.html>

La quema y venteo de gases trae como consecuencia contaminación ambiental, ya que se genera aproximadamente 350 millones de toneladas de CO₂ al año según el informe del banco mundial escrito por Goedder⁹⁶ y basado en los datos de la ANH, figura que 140.000 millones de metros cúbicos de gas se consumen en esos procedimientos anualmente, lo que representa el 4% de la producción industrial global. Razón por la cual, el implementar la tecnología de CAC (Captura y Almacenamiento de Carbono) ayudaría ambientalmente y generaría otras opciones para la utilización del CO₂.

⁹⁶ GOEDDER, Carlos. Informe de Banco Mundial proponen reducir quema y venteo de gas natural. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://inteligenciapetrolera.com.co/inicio/informe-de-banco-mundial-proponen-reducir-quema-y-venteo-de-gas-natural-por-carlos-goedder/>

3. DISEÑO METODOLÓGICO

La monografía de investigación se maneja de carácter descriptivo, se orienta al tema del calentamiento global, al de los sectores industriales que emiten gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono, como lo es el energético (petrolero, eléctrico en la parte de termoeléctricas las cuales utilizan combustibles fósiles como el gas y el carbón) y del de construcción (cemento). También los sumideros naturales que existen en el planeta Tierra, su función para ayudar a mitigar el cambio climático, y la tecnología de captura y almacenamiento de carbono.

La información se obtiene de la investigación de fuentes secundarias de tipo documental como lo son libros, artículos, investigaciones, películas documentales los cuales muestran las propiedades, características y formas sobre cuáles son las causas y consecuencias del calentamiento global, cuáles son las formas de reducir la concentración de dióxido de carbono de la atmósfera y se aclara el funcionamiento de la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂, junto con su contribución a la mitigación del cambio climático.

Se tiene en cuenta los antecedentes presentes en la problemática identificada y el tema de estudio, teniendo en cuenta el CO₂, los principales sectores industriales que lo producen, medidas de mitigación al cambio climático, sus causas y consecuencias, medidas naturales y artificiales que ayudan a ello, como lo son los sumideros en la parte natural y la tecnología de *Captura y Almacenamiento de Carbono* en la parte artificial.

Por último, después de haber culminado la investigación y el análisis propuesto, se presentan los respectivos resultados, discusiones y conclusiones, así mismo se encuentran recomendaciones en cuanto a la parte metodológica para una futura continuación del tema.

Lo anterior se encuentra en bases de datos de la Universidad de América como lo son EBSCO, OnePetro, Scopus y otras externas las cuales son SciELO, E-Book, Dialnet, revistas científicas de universidades, publicaciones de organizaciones, científicos e investigaciones que se encuentran en la red.

4. EL DIÓXIDO DE CARBONO COMO GAS DE EFECTO INVERNADERO

En los últimos dos siglos se han dado diferentes cambios concernientes al clima, a la salud, la tecnología, entre otros. Algunos factores que colaboran a ello según Barros⁹⁷ es el crecimiento de la población, por ende, el incremento de la demanda de recursos lo que modificó la superficie del planeta tierra. El ser humano cambió, sus costumbres, sus actividades cotidianas, sus fines ya no son los mismos; ya no se encuentran personas que cazan su propia comida, que adoran a la madre naturaleza, que viven en pro del ambiente; el enfoque se transformó y con ello el planeta se ha visto en problemas, los recursos naturales se están utilizando en una forma no sostenible lo que ocasiona su extinción, la contaminación incrementó y con ello el calentamiento global llegó; con este capítulo se pretende identificar el papel del dióxido de carbono (CO₂) como GEI en el calentamiento global.

Se habla del cambio climático, que según Barros⁹⁸, trata en la energía que llega en forma de radiación electromagnética a la tierra la cual parte es reflejada al espacio exterior y la restante es retenida en el planeta. Esa definición la sustenta el PNUMA⁹⁹ en el Proyecto de Ciudadanía Ambiental Global del 2005, donde dice que el clima ha cambiado muchas veces en la Tierra debido a cambios naturales producidos por el equilibrio energético entre la energía solar entrante y la energía reemitida por la Tierra hacia el espacio. Al mirar los registros históricos y geológicos se evidencian las variaciones del clima en una escala temporal, Benavides¹⁰⁰ afirma que se ve que desde comienzos del siglo XIV hasta mediados del XIX fue un periodo frío y después un periodo más cálido el cual llega hasta el presente, a finales del siglo XX y lo que va del XXI se han presentado los valores más altos en los últimos 130.000 años.

Existen varias causas para que ocurra el cambio en el clima, tanto de carácter externo como natural y también algunas causadas por el hombre; de acuerdo a Barros¹⁰¹, se encuentra la variación de la radiación solar que llega al planeta, los cambios en la composición química de la atmósfera por actividad volcánica u otros procesos de interacción con la litosfera, la cual es la capa externa de la tierra que tiene aproximadamente 10-50 kilómetros y se conoce como superficie terrestre,

⁹⁷ BARROS, Vicente. Op. Cit., p. 11.

⁹⁸ *Ibíd.*, p. 11-12.

⁹⁹ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. Op. Cit., 12.

¹⁰⁰ BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Op. Cit., p. 1.

¹⁰¹ BARROS, Vicente. Op. Cit., p. 39-40.

también están las alteraciones de la superficie de la tierra por procesos geológicos o por acción humana.

En los últimos años, han sido notables las consecuencias del calentamiento global, que hacen alusión a la temperatura del ambiente, al nivel del mar, a las precipitaciones y fenómenos climáticos extremos. A continuación se encuentran otros efectos según Romeo¹⁰², los cuales se encuentran relacionados con los nombrados anteriormente:

- Un incremento de temperatura entre 1.7-4.4°C se prevé para el año 2100.
- Se calcula un incremento del nivel del mar entre 21-48cm para el año 2100.
- Incremento de la evaporación y las precipitaciones, disminución de las heladas y del hielo marino.
- Mayor probabilidad en frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como las tormentas, inundaciones, sequías.
- Contaminación y escasez de las reservas de agua dulce.
- Desplazamiento y extinción de especies animales y vegetales.
- Incremento en el riesgo de incendios forestales.
- Mayor pérdida de bienes materiales, infraestructura, cultivos y vidas.
- Reducción en cantidad y calidad de los recursos hídricos.

Asimismo, además de todas las consecuencias nombradas, Herrán¹⁰³ considera que también se generaría un problema de seguridad global porque al incrementar más de 2°C, se llegaría a un territorio climático desconocido causando así una fuerte desestabilización social, económica, ambiental y política, trayendo repercusiones en el equilibrio de la paz y de la seguridad internacional.

Todo acontece porque el ciclo del carbono en sus transformaciones las cuales ayudan a regular el clima del planeta, ha tenido cambios. El ciclo se basa según explica Warner¹⁰⁴, en el dióxido de carbono, el cual constituye aproximadamente el 0.3% de la atmósfera; la síntesis se hace a partir del agua y de la fijación de alrededor del 10% del CO₂ que se encuentra en la atmósfera debido a la fotosíntesis que realizan las plantas, algas y bacterias. El carbono según expresa Benavides¹⁰⁵, se encuentra en la atmósfera y la hidrosfera como CO₂, metano y

¹⁰² ROMEO, Luis, *et al.* Op. Cit., p. 13-14.

¹⁰³ HERRÁN, Claudia. El cambio climático y sus consecuencias para América latina. En: Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert-FES. México: 2012, p. 8.

¹⁰⁴ WARNER, Barry; ARAVENA, Ramón y MORENO-CASASOLA, Patricia. Cambio climático y reciclaje de carbono en los humedales costeros. En: Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Instituto de Ecología, AC y Gobierno del Estado de Veracruz-Llave Xalapa, México: 2005. p. 297-318.

¹⁰⁵ BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Op. Cit., p. 9-10.

otros gases, en la litósfera, en las rocas, depósitos de carbón, petróleo y gas, en la biosfera y en la antropósfera también se encuentra, en fin, se encuentra en todo lado y las emisiones del mismo han incrementado por la acción del hombre, por lo cual se encuentra en mayor cantidad en la atmósfera. Además de ello, según el IPCC¹⁰⁶, el almacenamiento de CO₂ generado por el hombre continuará hasta el año 2100, lo que resultará en una mayor acidificación global de ellos a finales del siglo XXI.

La atmósfera es un “(...) fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal, que la energía absorbida la efectúan selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro”¹⁰⁷. Ésta actúa como un invernadero, por lo que hace que la temperatura de la Tierra incremente. Ésta como expresa Barros¹⁰⁸, está compuesta por agua, dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, los cuales son gases que pueden absorber parte de la radiación, por lo tanto, a mayor concentración de gases, mayor será la temperatura del planeta. Según Brown¹⁰⁹, una de las características de la atmósfera es que hace posible la vida al impedir el paso de la radiación nociva, también mantiene la temperatura moderada y para ello el CO₂ y el H₂O son importantes, debido a que el último contribuye al efecto invernadero y el primero ayuda a mantener la temperatura superficial.

Asimismo, como la atmósfera es importante para la vida, el efecto invernadero también lo es. Éste se da por el efecto invernadero asociado a los gases de efecto invernadero (GEI); consiste en que parte de la radiación emitida por el sol que entra al planeta es reflejada por los gases y devuelta al espacio, la parte restante entra a la Tierra, la anterior emite radiación infrarroja que es nuevamente reflejada o absorbida, como se muestra en la figura 20, en la parte izquierda se explica que es y cómo se da el efecto invernadero y en el derecho que es y en que consiste el calentamiento global.

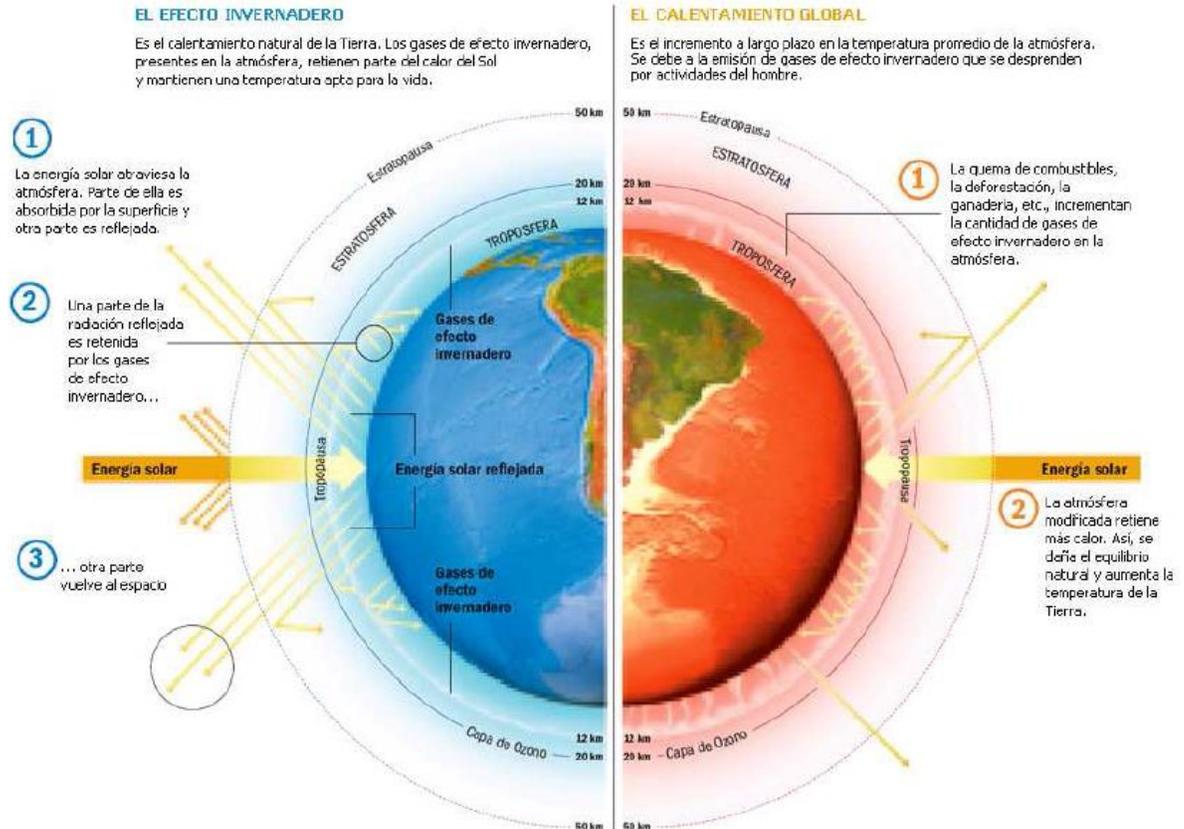
¹⁰⁶ IPCC, Op. Cit., p. 66.

¹⁰⁷ BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Op. Cit., p. 25.

¹⁰⁸ BARROS, Vicente. Op. Cit., p. 12.

¹⁰⁹ BROWN, Theodore, *et al.* Op. Cit., p. 781.

Figura 20. Efecto invernadero natural y su forzamiento, lo que induce al calentamiento global



Fuente: BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. En: Nota técnica del IDEAM. Vol. 8, (Dic, 2007); p. 30.

Sin embargo, los gases de efecto invernadero no son lo único producido por la industria y el hombre, también se encuentran partículas de ceniza, hollín y compuestos de azufre; de acuerdo con Romeo¹¹⁰, esas partículas flotan y junto con el aumento en la concentración de los GEI, generan opacidad infrarroja en la atmósfera la cual no deja pasar la luz al bloquearla, causando así oscurecimiento global. Se ha demostrado según estudios realizados que la radiación solar que llega al planeta ha disminuido un 10% en los últimos 50 años, haciéndose más notorio en países industrializados. El oscurecimiento global es, "(...) la reducción de la cantidad de luz solar que recibe la Tierra debido al "efecto espejo"¹¹¹; este efecto de espejo es el resultado de la unión de las partículas de los gases de efecto invernadero, que causan que tal luz se refleje nuevamente al espacio sin llegar al planeta". En la figura 21 se puede ver como la industria emite gases que

¹¹⁰ ROMEO, Luis, *et al.* Op. Cit., p. 9.

¹¹¹ NEGRÓN, Gloriselle. ¿Qué es el oscurecimiento global?. En: Catedrática Asociada en Salud Ambiental, Programa de Agricultura, Mercadeo y Recursos Naturales, 2011. p. 2.

van directamente al ambiente y la atmósfera, causando así el oscurecimiento global; éste según Negrón¹¹², trae diversos efectos en:

- La fotosíntesis de las plantas.
- El ciclo hídrico.
- Formación y composición de las nubes.
- Encubrimiento de los efectos del calentamiento global.

Figura 21. Oscurecimiento global



Fuente: LA RESERVA. ¿Qué es el oscurecimiento global? [En línea]. [1 marzo de 2017] disponible en: http://www.lareserva.com/home/oscurecimiento_global

Entre los gases emitidos por la industria se encuentra el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nítrico y el ozono, que tienen la propiedad de absorber la radiación por lo que son llamados GEI. De acuerdo a Barros¹¹³, otros gases pueden tener la misma característica, pero no contribuyen al equilibrio radiativo del planeta. De acuerdo con Isaza¹¹⁴, el dióxido de carbono, CO₂, es el segundo gas invernadero más abundante después del vapor de agua, está presente en la atmósfera por procesos naturales y por actividades antropogénicas.

¹¹² *Ibíd.*, p. 3.

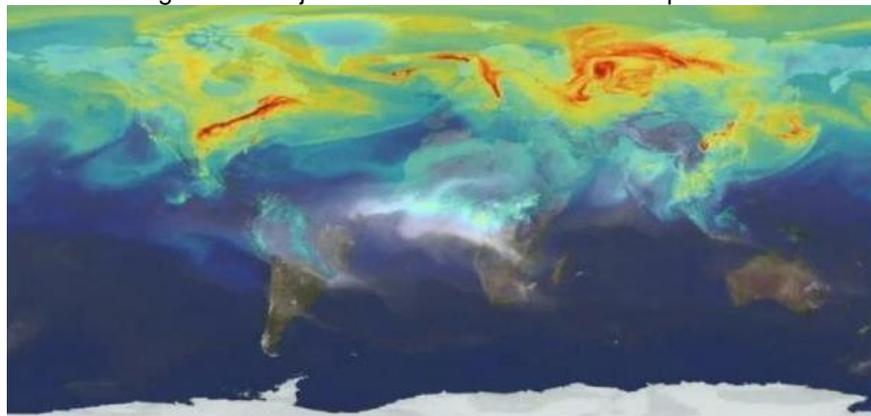
¹¹³ BARROS, Vicente. *Op. Cit.*, p. 35.

¹¹⁴ ISAZA, José Fernando y CAMPOS, Diógenes. *Cambio climático: Glaciaciones y calentamiento global*. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2007. ISBN: 978-958-9029-89-3. p. 158.

Su concentración ha aumentado desde la Revolución Industrial de 280ppm a 365ppm, según lo informa en PNUMA¹¹⁵ en el año 2005.

El CO₂ es un gas licuado ácido, no inflamable, incoloro e inodoro, pesa más que el aire y es soluble en agua, se produce además de procesos naturales como la respiración y la fotosíntesis, en la industria, también por combustión de gases y otros combustibles fósiles. De acuerdo a Carburos Metálicos¹¹⁶, tiene uso en diferentes sectores como lo es el de alimentos, medicina, plásticos celulares, catering, entre otros. Los países industrializados como lo son Estados Unidos, Europa y Asia, generan gran cantidad de este gas como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Flujo del dióxido de carbono en el planeta



Fuente: NATIONAL GEOGRAPHIC. La NASA presenta una simulación con los flujos de dióxido de carbono. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: <http://nationalgeographic.es/noticias/simulacion-dioxido-carbono-noticia-utm-source-yhoo-utm-medium-partner-utm-campaign-yhoo>

La NASA creó una simulación de 75 días desde mayo hasta junio en el 2007, creando la figura 22 anteriormente mostrada. Donde se evidencian remolinos rojos, los cuales son dióxido de carbono procedentes de los centros industriales más importante del planeta. National Geographic¹¹⁷ asegura que gran cantidad de ese gas es absorbido por los bosques, vegetación y océanos, también llamados sumideros de carbono.

¹¹⁵ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. Op. Cit., 11.

¹¹⁶ CARBUROS METÁLICOS. Dióxido de carbono. [En línea]. [1 marzo de 2017] disponible en: <http://www.carburos.com/products/Gases/Carbon-Dioxide.aspx>

¹¹⁷ NATIONAL GEOGRAPHIC. La NASA presenta una simulación con los flujos de dióxido de carbono. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: <http://nationalgeographic.es/noticias/simulacion-dioxido-carbono-noticia-utm-source-yhoo-utm-medium-partner-utm-campaign-yhoo>

Además la European Commission¹¹⁸ dice que el CO₂ es el responsable de más del 60% del efecto invernadero y representa más del 80% de las emisiones de GEI en los países industrializados. Y según National Geographic¹¹⁹, aunque otros gases de efecto invernadero puedan retener más calor que el CO₂, como por ejemplo, el metano que lo produce más de 20 veces, al tener las concentraciones más altas, el CO₂ es el de mayor importancia para este caso, ya que es el que más aumenta el calor en la atmósfera. En cifras, la IEA¹²⁰ publica que globalmente se emitieron más de 21.000 millones de toneladas métricas en el 2001 por la quema de petróleo, carbón y madera; y se estima que para el año 2525, las emisiones serán más de 35.000 millones de toneladas métricas de CO₂.

Según Barros¹²¹, los gases tienen un tiempo medio de vida en la atmósfera, el cual depende en el tiempo en el cual una molécula es removida de la atmósfera, el tiempo medio de remoción del CO₂ es de cuatro años, pero incrementa a entre 100 y 150 años por la interacción con la biosfera y el océano. Acorde a Brown¹²², la mayor parte del CO₂ la absorben los océanos o lo usan las plantas para la fotosíntesis, sin embargo, actualmente se produce más rápido este gas de lo que se puede absorber o utilizar.

Por lo tanto, Lord¹²³ manifiesta que no es de extrañar, que el dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera haya causado perturbaciones y como se muestra en la figura 23, hay un modelo de predicción con diferentes escenarios; teniendo como referencia el color blanco que es el del estado preindustrial; en el eje x que es el horizontal, se encuentran los años de 1 hasta un millón que está representado como 1m, teniendo en cuenta que la letra "k" son miles, es decir si está 10k, quiere decir 10.000 años, y en el eje y, que es el vertical, se encuentra el total de emisiones de carbono en Pg C que significa toneladas de carbono, por sus siglas en inglés; las respuestas van variando acorde al escenario.

¹¹⁸ EUROPEAN COMMISSION. Comprender los gases de efecto invernadero. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf

¹¹⁹ NATIONAL GEOGRAPHIC. Causas del calentamiento global. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/calentamiento-global-causas>

¹²⁰ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). System for the analysis of Global Energy Markets. [En línea]. [8 septiembre de 2004] disponible en: http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/figure_17.html, citado por BENNACEUR, Kamel, *et al.* Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. En: Oilfield Review. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 49.

¹²¹ BARROS, Vicente. Op. Cit., p. 47.

¹²² BROWN, Theodore, *et al.* Op. Cit., p. 781.

¹²³ LORD, Natalie, *et al.* An impulse response function for the "long tail" of excess atmospheric CO₂ in an earth system model. En: Global Biogeochemical Cycles. Vol. 30, No.1 (Sept, 2016); p. 7.

En el primer recuadro (a) se muestra la concentración en ppm de CO₂ a lo largo de los años, evidenciándose que la concentración de dióxido es tan alta y perdurable, que ni siquiera en un millón de años se llega a la concentración del estado preindustrial; para lograrlo se necesitaría de cientos de miles de años para que llegue a 359.8ppm en el escenario de 20.000Pg C y 282.9ppm en el de 1000Pg C, es decir, entre mayor concentración de dióxido de carbono, se demora más en ser eliminado de la atmósfera según Lord¹²⁴.

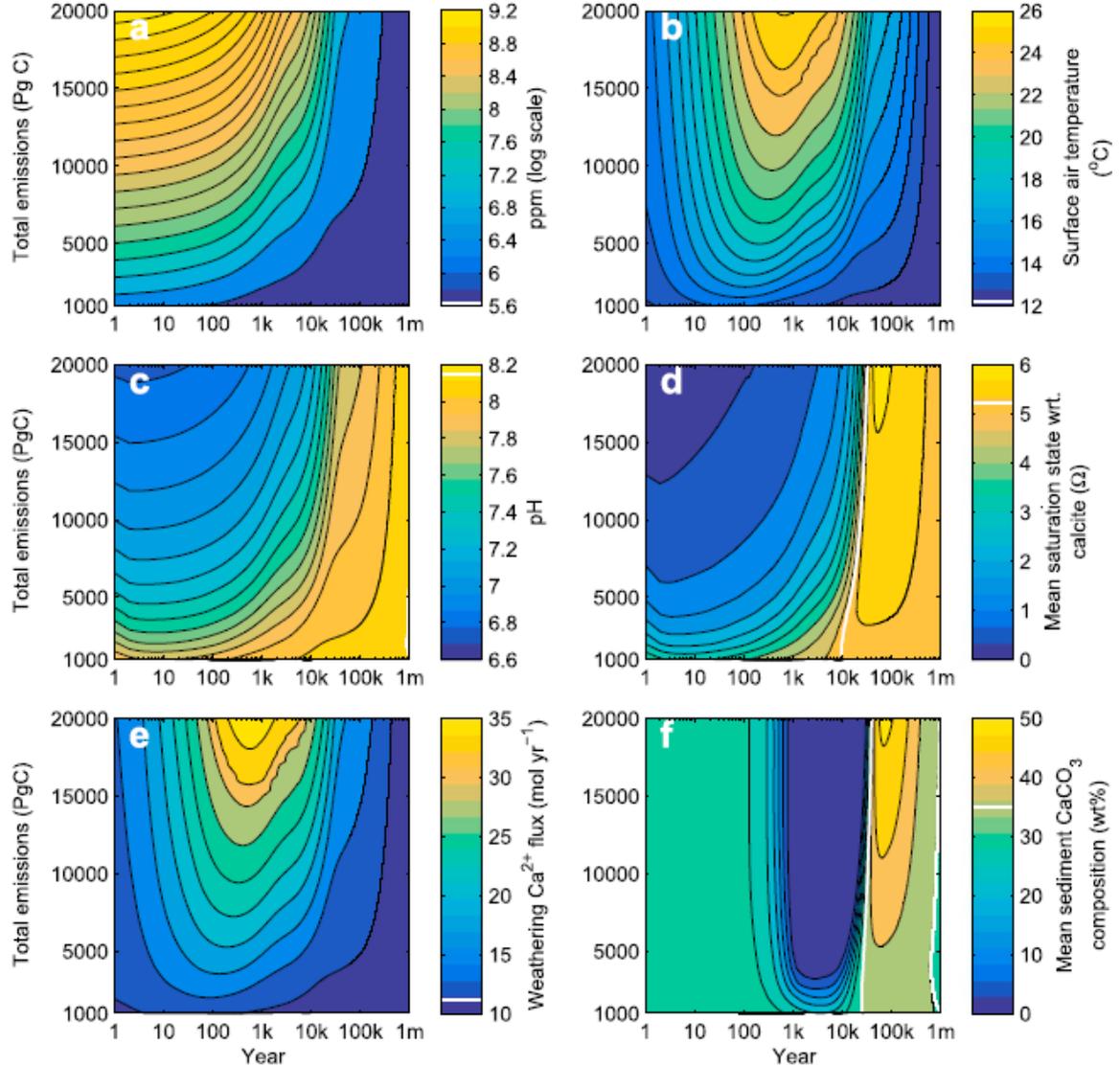
Hay más impactos asociados a altos niveles de ppm de CO₂, de acuerdo a Lord¹²⁵, por ejemplo, en el recuadro (b) se encuentra la temperatura superficial en grados centígrados, donde se muestra que entre los años 60 y 1000 (1k), se llega a la temperatura máxima, también se indica que cerca del millón de años se puede alcanzar la temperatura del estado preindustrial; en el (c) se muestra el pH de la superficie del océano, referente a la acidificación del océano, como se sabe el pH neutro es 7, menor es ácido y en el estado preindustrial se encuentra cerca de 8.2, valor que se logra alcanzar al pasar un millón de años; en el recuadro (d) se evidencia el estado de saturación de calcita en el océano causado por la meteorización del carbonato, el cual según el recuadro, dura miles de años, aproximadamente, 10.000 años; en el (e) se grafica el flujo global de Ca²⁺ hacia el océano a partir del carbonato terrestre y la erosión del silicato y en el (f) se encuentra la composición promedio de CaCO₃ en sedimentos del fondo marino.

Los recuadros a, b, c y e, tienen algo en común y es que experimental una perturbación inicial después de las emisiones de CO₂, que luego disminuye lentamente con el tiempo; mientras que el d, la saturación media de la superficie muestra una evolución más compleja con el paso del tiempo.

¹²⁴ *Ibíd.*, p. 8.

¹²⁵ *Ibíd.*, p. 8.

Figura 23. Respuesta del clima a las emisiones antropógenas para diferentes escenarios



Fuente: LORD, Natalie, *et al.* An impulse response function for the "long tail" of excess atmospheric CO₂ in an earth system model. *En: Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 30, No.1 (Sept, 2016); p. 7.

Todo lo anterior puede traer mayores consecuencias a las ya vistas y vividas, mayores sequias, inundaciones, enfermedades, muerte, extinción de especies, uso irracional de los recursos naturales, entre otros, razón por la cual es necesario un cambio de pensamiento para emprender acciones y tener un enfoque integrado respecto al calentamiento global, no solamente pensando en la mitigación, sino, también en la adaptación.

Según el IPCC¹²⁶, la adaptación puede hacer que disminuya el riesgo de impacto del cambio climático, contribuye al bienestar de las poblaciones actuales y futuras, pero su eficacia es limitada. El PNUMA¹²⁷ indica que se enfoca en los impactos locales y específicos, además de ponerle atención a los sectores más desprotegidos de la sociedad y consiste en desarrollar la capacidad para aplacar los impactos al crear o potenciar las defensas a ellos, esto varía según países, regiones y grupos socioeconómicos.

La mitigación tiene una influencia global, puesto a que la reducción de las emisiones impacta sobre todo el planeta; algunas acciones para ello se dan en actividades cotidianas y económicas, al darle uso eficiente a los recursos. Por ejemplo, en la industria se puede utilizar la política de las 3R “reducir, reutilizar y reciclar”, pero para lograrlo, primero se requiere de una toma de conciencia respecto al cambio climático.

Las acciones para mitigar el fenómeno se pueden realizar en varios sectores, por ejemplo, en la industria se pueden emplear tecnologías limpias las cuales además de reducir las emisiones de GEI, logran disminuir la cantidad de otros contaminantes y aumentar la eficiencia energética, otro ejemplo en otro sector, el energético, es el cambio del uso de fuentes de energía convencional a las renovables, estas últimas contribuyen al desarrollo sostenible y minimización de emisiones, entre ellas se encuentran la energía hidroeléctrica, solar, biomasa, geotérmica y eólica; aparte de lo anteriormente nombrado, el PNUMA¹²⁸ ve a la mitigación como una intervención por el hombre para reducir las emisiones de GEI o aumentar los sumideros.

¹²⁶ IPCC, Op. Cit., p. 86.

¹²⁷ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. Op. Cit., 26-27.

¹²⁸ *Ibíd.*, 24-25.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUMIDEROS DE CARBONO

Los sumideros de carbono se refieren a los flujos netos de carbono que existen desde la atmósfera al sistema, lo que se evidencia en el balance de carbono según indica Pardos¹²⁹; en otras palabras, según explica Carvajal¹³⁰, es todo sistema o proceso por el cual se extrae un gas o gases de la atmósfera y se almacena, ya sea de manera natural o artificial. De manera natural se encuentran los océanos y la vegetación, entre ésta están la tundra, los bosques, los pastizales, los humedales, entre otros que fueron previamente explicados y los artificiales que se refiere a la tecnología creada por el hombre para cumplir las mismas funciones; a lo largo del presente capítulo se pretende explicar las características de los sumideros de carbono naturales y artificiales.

El carbono se almacena en la Tierra en los lugares enunciados previamente, el CO₂ se encuentra disuelto en el agua, también se encuentra sólido como carbonato en rocas calizas o corales y como combustible fósil como lo es el carbón, el petróleo y el gas, asimismo se halla en la naturaleza, en plantas vivas y materia orgánica muerta. Como se muestra en la figura 24 y como el CO2CRC¹³¹ explica, el carbón circula continuamente en el llamado ciclo del carbono explicado anteriormente, el cual según es un ciclo que rige al planeta aproximadamente desde hace 400 millones de años. En la figura 25 se observa con mayor claridad el ciclo, donde se encuentra un proceso enumerado del 1 al 5 según la FAO¹³² dónde:

1. Las plantas utilizan el CO₂ de la atmósfera, el agua de la tierra y la luz del sol para crecer y producir alimento mediante el proceso de la fotosíntesis; asimismo, absorben carbono del aire lo que pasa a ser parte de la planta.
2. Los animales que se alimentan de plantas hacen que el carbono tenga un papel en la cadena alimenticia.
3. La mayoría de carbono que consumen los animales se convierte en dióxido de carbono a través de la respiración.

¹²⁹ PARDOS, José. Op. Cit., p. 27.

¹³⁰ CARVAJAL, Micaela, *et al.* Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. España, CSIC. 2014. p. 3.

¹³¹ CO2CRC. Carbon dioxide (CO₂). [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: http://old.co2crc.com.au/aboutccs/greenhouse_gases.html

¹³² FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático, los suelos juegan un papel clave en el ciclo del carbono. [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/Fact_sheets/Es_IYS_CICng_Print.pdf

4. Al morir, tanto animales como plantas, son ingeridos por descomponedores, llamados bacterias y hongos; y el carbono de los cuerpos vuelve a la atmósfera en forma de CO₂.
5. A veces, los animales y plantas muertos, se convierten en combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, los cuales se extraen tiempo después para generar energía y otros productos; para los procesos anteriores se genera una combustión la cual envía parte del carbono a la atmósfera como CO₂.

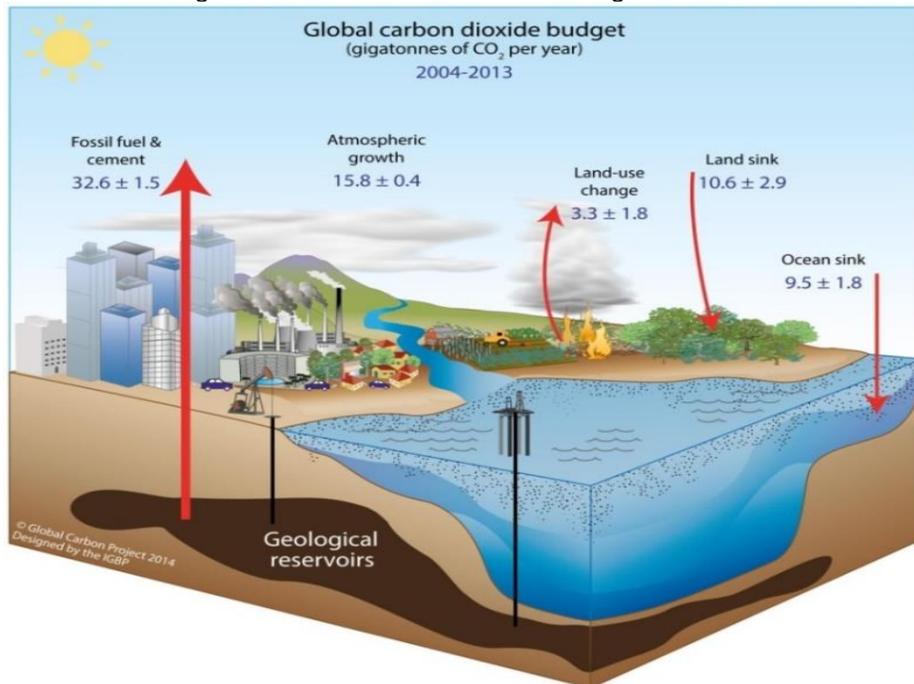
Evidentemente no todo el CO₂ que emite el hombre permanece en la atmósfera, según la UNESA¹³³, gran parte es absorbido por la tierra y océanos que se encuentran en la capa donde se desarrolla la vida en el planeta, llamada biosfera. Se estima que ésta fija alrededor de 2'000.000 toneladas/año, ese es el resultado de la diferencia entre el CO₂ absorbido durante la fotosíntesis y el emitido a la atmósfera por la respiración.

Para saber si se trata de un sumidero o de una fuente de carbono, explica la Federación Española de municipios y provincias¹³⁴, hay que tener en cuenta el balance neto de los flujos de carbono, las absorciones y emisiones; si el balance resulta ser positivo, es un sumidero y de ser negativo es una fuente, dependiendo del clima y del tipo de suelo.

¹³³ ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA (UNESA). Forestación y Reforestación. Sumideros de Carbono. En: Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto – Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica, 2005, citado por CARVAJAL, Micaela, *et al.* Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. España, CSIC. 2014. p. 3.

¹³⁴ FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit, p. 21.

Figura 24. Global carbon dioxide Budget



Fuente: UNREDD. REDD+ and the Global Carbon Budget: remembering the “+”. [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: <https://unredd.wordpress.com/2014/12/03/redd-and-the-global-carbon-budget-remembering-the/>

Figura 25. Proceso del ciclo del carbono



Fuente: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático, los suelos juegan un papel clave en el ciclo del carbono. [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/Fact_sheets/Es_IYS_CICng_Print.pdf

5.1 OCÉANOS

Desempeñan funciones muy importantes, es uno de los principales sumideros de carbono ya que absorbe grandes cantidades de carbono las cuales al reaccionar con el agua forma ácido carbónico (H_2CO_3), entre más se absorba, más incrementa la concentración del ácido; aunque se mantenga el carbono en forma de iones HCO_3^- y CO_3^{2-} para regular la acidez, medida en potencial de hidrógeno (pH). Según Brown¹³⁵, esa capacidad de regular, amortiguar disminuye a medida que incrementa la concentración de CO_2 en la atmósfera. De acuerdo a Benavides¹³⁶, también transportan calor y al mezclarse descendientemente, aminoran el ritmo de calentamiento de la superficie; además son lo que ocupa la mayor parte de la superficie terrestre.

Juegan un papel sustancial en cuanto al cambio climático, como se nombró anteriormente, y menciona Ríos¹³⁷, regula el clima, actúa como un almacén de energía solar, la cual se recibe y distribuye, modificando la concentración de dióxido de carbono. Han absorbido un tercio de todo el CO_2 liberado por actividades antropogénicas.

Gracias al fitoplancton el océano cumple su función, éste es una “(...) forma vegetal del plancton (por ejemplo, las diatomeas). El fitoplancton está compuesto por las plantas predominantes en el mar, y son la base de alimentación marina. Estos organismos unicelulares son los principales agentes para la fijación fotosintética del carbono en el océano”¹³⁸. Es importante por ser el productor primario del medio marino y se encarga de fijar el CO_2 atmosférico de manera tal que el carbono se convierte en parte de la cadena alimentaria, es decir, como se menciona en ciencia y biología¹³⁹; en fuente de energía y es el que fija el carbono mediante la fotosíntesis, en la figura 26 se muestra una vista microscópica de una de las clases del fitoplancton.

El calentamiento de los océanos puede alterar el futuro de la población de fitoplancton, según un estudio de especialistas de la Universidad Estatal de Michigan, si se incrementa la temperatura y se disminuye el pH, aumentando la

¹³⁵ BROWN, Theodore, *et al.* Op. Cit., p. 784.

¹³⁶ BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Op. Cit., p. 19.

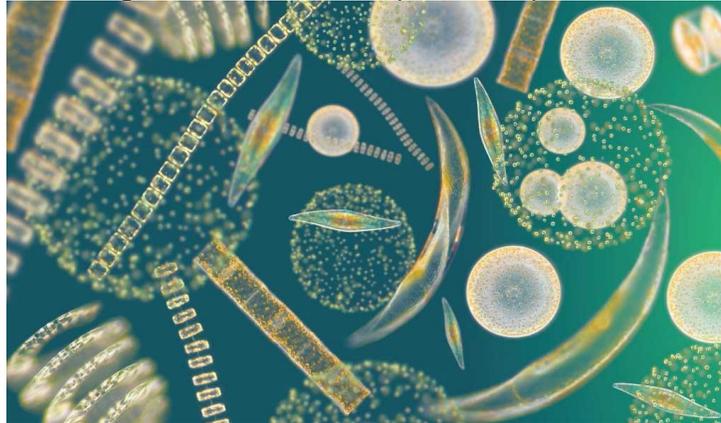
¹³⁷ RÍOS, Aida. Captación de CO_2 antropogénico en el Atlántico. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: http://www.udc.es/iuem/documentos/doc_xornadas/cambioclimatico/aidafdez.pdf

¹³⁸ GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Glosario de términos: fitoplancton. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>

¹³⁹ CIENCIA Y BIOLOGÍA. Fitoplancton. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://cienciaybiologia.com/fitoplancton/>

acidez de los océanos; el fitoplancton puede no adaptarse y producirá un desplazamiento hacia los polos del mismo, causando así una disminución de la especie en las aguas ecuatoriales, trayendo consigo un declive del 40% en la biodiversidad, según informa la FAO¹⁴⁰.

Figura 26. Vista microscópica del fitoplancton



Fuente: NTR PERIODISMO CRÍTICO. Fitoplancton marino contribuiría a formar hielo en las nubes: expertos. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://ntrzacatecas.com/2015/09/11/fitoplancton-marino-contribuiria-a-formar-hielo-en-las-nubes-expertos/>

La acidificación del océano, según dice Hardt¹⁴¹, es un grave problema, puesto a que, a medida que se acidifica más, los corales y animales tienen dificultad para construir sus esqueletos y conchas, además, afecta su crecimiento y reproducción. Un ejemplo de ello lo publica Tollefson¹⁴², cuando se evidenció cuando un equipo de la Institución Carnegie de California utilizó una sustancia alcalina para imitar las condiciones pre-industriales del océano, obteniendo como resultado que la velocidad de crecimiento de los corales aumentó aproximadamente un 7%, concluyendo que la acidificación ya está frenando el crecimiento de los mismos. Además de ello, el ritmo de acidificación es más de 10 veces superior al de cualquier otro momento en los últimos 55 millones de años.

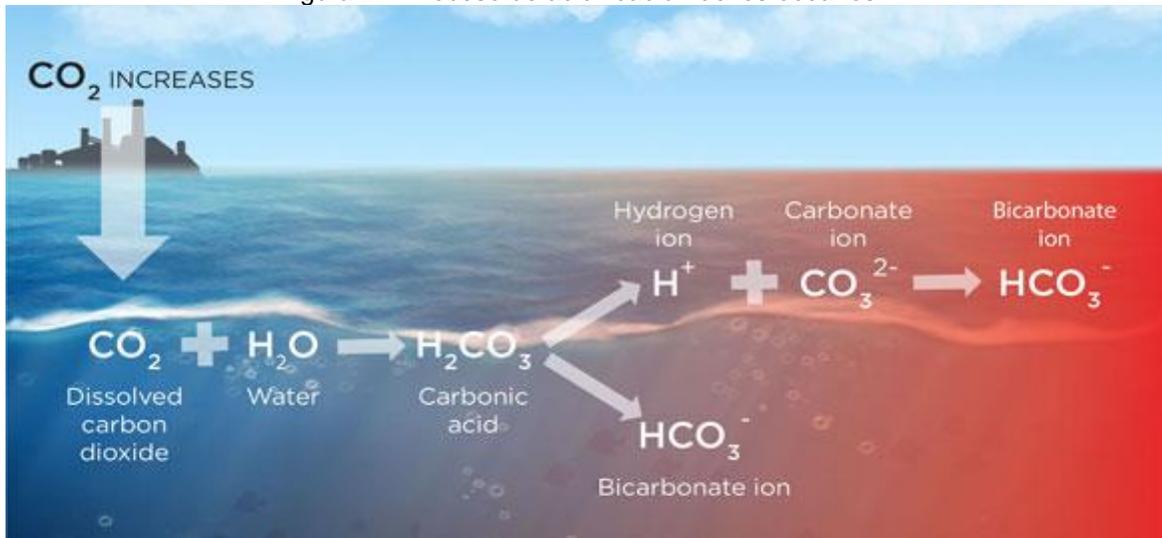
¹⁴⁰ ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ALCALDES (OLA). La futura pérdida de diversidad en el fitoplancton y su efecto climático. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://www.oladsc.org/index.php/2015/10/05/la-futura-perdida-de-diversidad-en-el-fitoplancton-y-su-efecto-climatico/>

¹⁴¹ HARDT, Marah. La vida oceánica, amenazada. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/numero/409/la-vida-ocenica-amenazada-8425>

¹⁴² TOLLEFSON, Jeff. La acidificación del océano está frenando el crecimiento de los arrecifes de coral. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/la-acidificacion-del-océano-esta-frenando-el-crecimiento-de-los-arrecifes-de-coral/#>

Como se muestra en la figura 27, el CO_2 es absorbido o entra al océano a cierta velocidad, dependiendo de la temperatura del agua y la cantidad del gas; acorde a Hagan¹⁴³, reacciona con el agua formando ácido carbónico, como el ácido es débil, este se descompone en iones de bicarbonato e hidrógeno (H^+), al incrementar los iones de hidrógeno que son los que le dan acidez al agua, disminuyen los de carbonato, los cuales son los necesarios para que los mariscos construyan sus conchas.

Figura 27. Proceso de acidificación de los océanos



Fuente: HAGAN, John y LEPAGE, Liza. Litmus Test: How we're changing the chemistry of our oceans. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://magazine.manomet.org/winter2014/litmustest.html>

Hay 20 hechos sobre la acidificación del océano que encontró la International Atomic Energy Agency (IAEA)¹⁴⁴, algunas de ellas son:

1. La acidificación del océano (AO) es el aumento progresivo en la acidez del océano sobre un largo periodo de tiempo, también puede ser causado o incrementado por la adición o remoción de otros compuestos químicos del océano.

¹⁴³ HAGAN, John y LEPAGE, Liza. Litmus Test: How we're changing the chemistry of our oceans. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://magazine.manomet.org/winter2014/litmustest.html>

¹⁴⁴ AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (IAEA). 20 hechos acerca de la acidificación del océano. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.iaea.org/ocean-acidification/download/Resources/Audience/Policy%20makers/OA20FactsSpanish.pdf>

2. La AO ha sido bien documentada con observaciones durante décadas por varios investigadores, razón por la cual se le atribuye al incremento del CO₂ atmosférico generado por el hombre.
3. La AO puede entenderse como la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) en un líquido, y el pH es la escala logarítmica con la cual se mide la concentración; mientras la acidez aumenta, el pH disminuye.
4. El pH global ha disminuido desde 8.2 a 8.1 en la superficie del océano, lo que corresponde a un aumento del 30% en la acidez, lo que permite pronosticar que para el año 2100 se encontrará el pH en valores de 7.8-7.9.
5. Es improbable que el pH de la superficie del océano llegue a ser ácido, es decir menor a 7.0, debido a que se encuentran sales disueltas que amortiguan la acidez.
6. La AO modifica la química de los carbonatos del agua de mar.
7. Por lo anterior, los organismos marinos deben gastar más energía que es necesaria para procesos biológicos.
8. Algunos organismos marinos son sensibles a cambios en el pH, a la química de los carbonatos y al alto nivel de CO₂.
9. El impacto biológico será variable ya que hay algunos organismos con un mayor rango de sensibilidad a los cambios.
10. No matará toda la vida del océano, pero si se evidenciarán cambios en la mayoría de especies.
11. La completa recuperación de los océanos requerirá entre décadas a cientos de milenios.

Lo anterior fue en cuanto a los océanos, Kanninen¹⁴⁵ dice que los otros sumideros de carbono se encuentran en los ecosistemas terrestres, que para cumplir su función necesitan de un área de estos mismos y una densidad de carbono por unidad de área.

¹⁴⁵ KANNINEN, Markku. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s09.htm>

5.2 TUNDRA

Según Llamas¹⁴⁶, es un terreno abierto y llano, con falta de vegetación arbórea, suelos cubiertos de musgos y líquenes, suelen ser pantanosos ya que aunque la capa de suelo permanece congelada, en el verano se derrite un poco la parte superficial; suelen estar cerca a los polos. Comprende regiones del norte de Alaska, Canadá y Rusia, sus dos principales características son que primero, debe tener el suelo helado permanentemente, llamado *permafrost*, el cual se explicará más adelante y segundo, acorde a Ecosistemas¹⁴⁷, se encuentran pocos árboles o ninguno, por lo que se encuentra conformada por musgos, hierbas y pequeños arbustos como se muestra en la figura 28; la fauna que se encuentra, según el ABC¹⁴⁸ comprende renos, lobos, liebres árticas, halcones, búhos, zorros árticos, osos polares, focas, nutrias, aves migratorias como las grullas, ánsares, cisnes y limícolas, junto con gran variedad de insectos; también allí viven los esquimales y pastores de renos.

Se cree que es el bioma más joven de todo el mundo, formándose hace solo 10.000 años, aproximadamente cubre el 20% de la superficie terrestre, además no posee mucha luz solar en invierno, solamente en verano, según informa Biopedia¹⁴⁹. De acuerdo a Ciencia y Biología¹⁵⁰, las precipitaciones son escasas y hay baja tasa de evaporación, la temperatura en invierno es aproximadamente de -28°C y en verano entre 0-10°C, lo que evita que el suelo se descongele, solamente entre los 30-100 cm superiores del suelo se descongelan en el verano, teniendo en cuenta que como lo dice el PMEL¹⁵¹, el grosor del *permafrost* suele ser de alrededor de 50-650 metros, se vuelve más grueso hacia el norte.

¹⁴⁶ LLAMAS, Liliana, *et al.* Ciclo biogeoquímico del carbono, la Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <https://ecobiouvm.files.wordpress.com/2008/03/ciclo-del-carbono.pdf>

¹⁴⁷ ECOSISTEMAS, Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://ecosistemadcc.weebly.com/tundra.html>

¹⁴⁸ ABC. La tundra y la taiga. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.abc.com.py/articulos/la-tundra-y-la-taiga-923062.html>

¹⁴⁹ BIOPIEDIA. Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biopedia.com/tundra/>

¹⁵⁰ CIENCIA Y BIOLOGÍA. Biomas terrestres: La tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://cienciaybiologia.com/biomas-terrestres/#Biomas_terrestres_la_tundra

¹⁵¹ LABORATORIO AMBIENTAL MARINO DEL PACÍFICO (PMEL). Land-Permafrost. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/detect/land-permafrost.shtml>

Figura 28. Tundra ártica en Alaska



Fuente: CIENCIA Y BIOLOGÍA. Biomas terrestres, La tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://cienciaybiologia.com/biomas-terrestres/#Biomas_terrestres_la_tundra

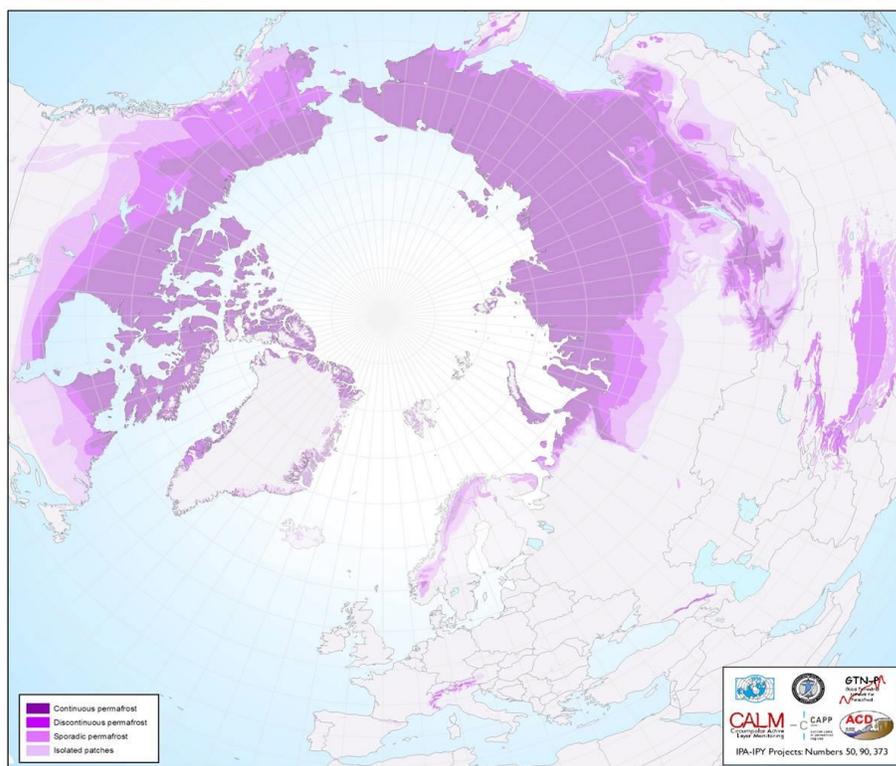
Es uno de los biomas más amenazados por el cambio climático y si llegase a descongelarse el *permafrost* se liberarían grandes cantidades de gases de efecto invernadero como lo es el dióxido de carbono y el metano, alterando el equilibrio del carbono del Ártico e incrementando el calentamiento global; según Miller¹⁵², últimamente el *permafrost* se está calentando más rápidamente que la temperatura del aire del Ártico, de 1,5 a 2,5°C en los últimos 30 años.

El *permafrost* es un terreno, ya sea tierra, roca, hielo o material orgánico que permanece a menos de 0°C durante dos años consecutivos, en el hemisferio norte ocupa aproximadamente el 25% del área terrestre, lo que se traduce en 23 millones de kilómetros cuadrados. Se clasifica según la IPA¹⁵³, según su continuidad geográfica, se encuentra el continuo (90-100% del paisaje), discontinuo (50-90%) y esporádico (0-50%) como se muestra en la figura 29. El discontinuo y esporádico tiene un espesor variante desde 1m hasta 1500m.

¹⁵² MILLER, Charles. ¿Es el permafrost del Ártico el "gigante dormido" del cambio climático?. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/24jun_permafrost

¹⁵³ ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DEL PERMAFROST (IPA). WHAT IS PERMAFROST?. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://ipa.arcticportal.org/publications/occasional-publications/what-is-permafrost>

Figura 29. Distribución global del *permafrost*



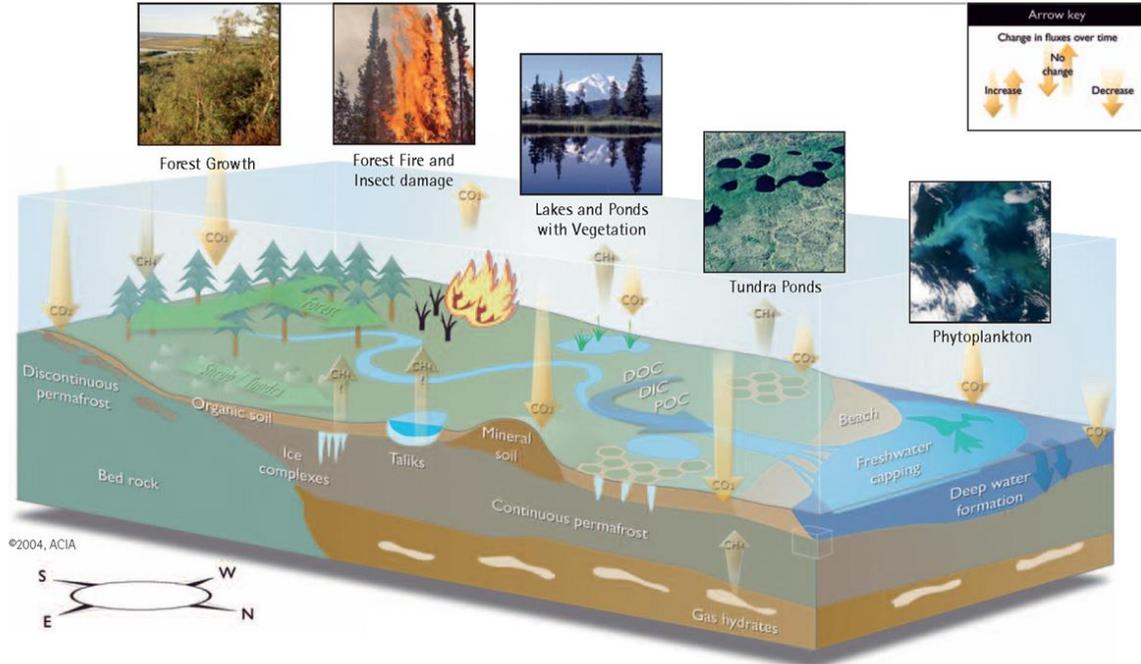
Fuente: ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DEL PERMAFROST (IPA). What is permafrost?, Permafrost distribution. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://ipa.arcticportal.org/images/stories/permafrost%20map.jpg>

Como se nombró anteriormente y como especifica National Geographic¹⁵⁴, el derretimiento del *permafrost* está contribuyendo al calentamiento global, debido a que como alberga cerca del 14% del carbono de la Tierra al estar congelado, pero las altas temperaturas ocasionan que emitan el gas al derretirse, pasando de ser un sumidero a una fuente. Para ello, según Cheek¹⁵⁵, es importante comprender las reacciones cuando el clima cambia, los flujos de carbono, lo que entra y lo que sale de los sistemas terrestres, teniendo en cuenta que las plantas captan el CO₂ mediante el proceso de la fotosíntesis y lo libera a la atmósfera cuando se descomponen o queman, en la figura 30 se pueden observar los diferentes sumideros de carbono, incluyendo a la tundra, además en la parte inferior se encuentra el *permafrost*, el cual ha almacenado carbono desde hace milenios.

¹⁵⁴ NATIONAL GEOGRAPHIC. Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.com/environment/habitats/tundra-biome/>

¹⁵⁵ CHEEK, Joseph. What is happening to carbon in Arctic tundra permafrost?. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.sciencepoles.org/interview/what-is-happening-to-carbon-in-arctic-tundra-permafrost>

Figura 30. Cambio de flujos de carbono en el tiempo en diferentes ecosistemas



Fuente: DEVITT, Terry. We know? We look, study and... [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://whyfiles.org/tag/arctic/feed/>

5.3 BOSQUES

Los bosques cumplen con su papel para mitigar el cambio climático al actuar como sumideros de carbono, de hecho después del océano, son los que más absorben carbono de la atmósfera; todo gracias a la fotosíntesis. Asimismo, Compensaforest¹⁵⁶ considera que son fuentes de carbono cuando se generan incendios, cuando se producen enfermedades o plagas, cuando hay inundaciones y otros fenómenos meteorológicos, también con la deforestación, al extraer madera y cuando se realiza una gestión inadecuada, son emisores del gas.

El carbono, según Compensaforest¹⁵⁷, es almacenado en la biomasa viva que se encuentra en la superficie el suelo, el tronco, las ramas, las semillas y en las hojas; y bajo tierra, en las raíces vivas, también se almacena en la materia orgánica muerta, es decir en la madera muerta, en la hojarasca y en los suelos.

¹⁵⁶ COMPENSAFOREST. Los sistemas forestales como sumideros de CO₂. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <https://compensaforest.es/los-sistemas-forestales-como-sumideros-de-co2/>

¹⁵⁷ COMPENSAFOREST. Los sistemas forestales como sumideros de CO₂. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <https://compensaforest.es/los-sistemas-forestales-como-sumideros-de-co2/>

Jandl¹⁵⁸ dice que en los suelos forestales se contiene cuatro veces la cantidad de carbono que la vegetación y aunque los bosques no tienen la capacidad de almacenar todo el carbono que se emite, lo puede retener por décadas o miles de años hasta que se cortan, queman o mueren. Acorde a la Federación Española de municipios y provincias¹⁵⁹, la capacidad de absorción y captación de carbono de los bosques depende principalmente de las características de la vegetación, del clima y del tipo de suelo en el que se encuentra.

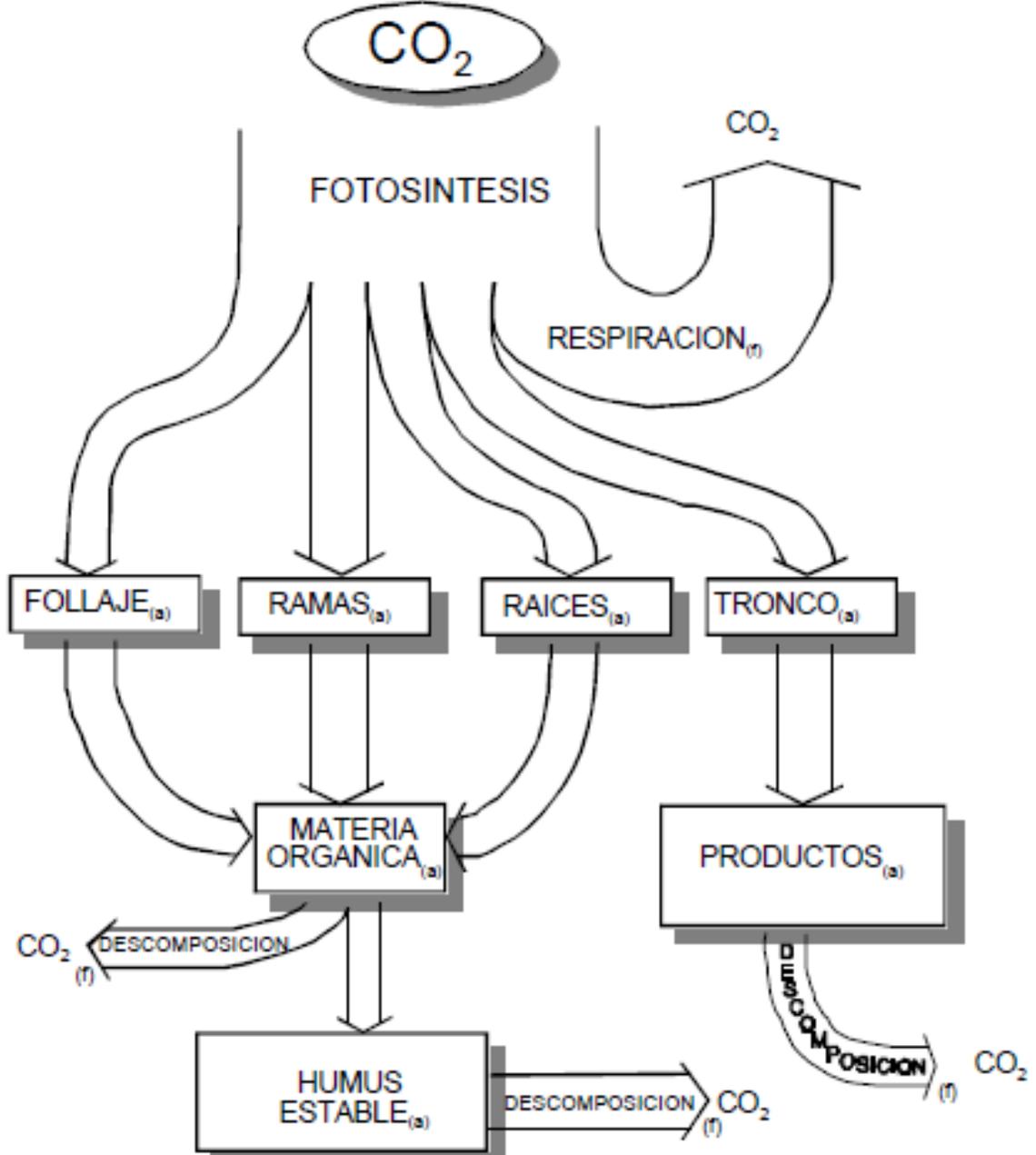
De acuerdo con Ordoñez¹⁶⁰, la vegetación es la encargada de incorporar el carbono al ciclo biológico por la fotosíntesis, lo que ayuda a la formación de la glucosa que a su vez contribuye al desarrollo de la estructura de los árboles, las ramas, raíces, tronco, follaje; el árbol va creciendo en altura y grosor de tronco, la copa del mismo necesita energía solar y con el paso del tiempo va aportando materia orgánica al suelo, la cual al degradarse, aporta CO₂ al entorno. En la figura 31 se muestra un diagrama de flujos y almacenes de carbono en el ecosistema forestal, donde el follaje, ramas, raíces, tronco, materia orgánica, productos y el humus son almacenes.

¹⁵⁸ JANDL, Robert. Secuestro de carbono en bosques: El papel del suelo. En: Revista Forestal Iberoamericana. Vol. 1, N°.1. 2005. 6p.

¹⁵⁹ FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS, Op. Cit, p. 24.

¹⁶⁰ ORDOÑEZ, A. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F. 1999, citado por BENJAMÍN, José y MASERA, Omar. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques. Xalapa, México. Vol. 7. No.1. (2002); p.6. ISSN: 1405-0471.

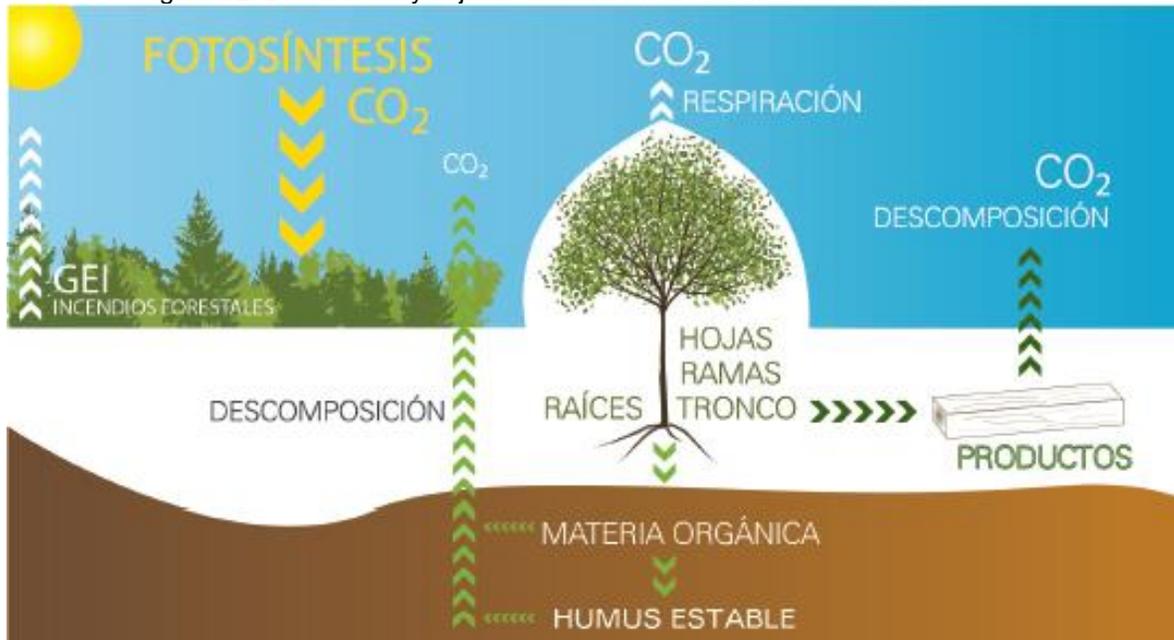
Figura 31. Diagrama de los flujos (f) y almacenes (a) de carbono en un ecosistema forestal



BENJAMÍN, José y MASERA, Omar. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques. Xalapa, México. Vol. 7. No.1. (2002); p.7. ISSN: 1405-0471.

Para mayor claridad del diagrama anteriormente presentado, a continuación se encuentra la figura 32 con imágenes para mayor entendimiento de la distribución y flujo de carbono en un ecosistema terrestre.

Figura 32. Distribución y flujo de carbono en un ecosistema terrestre



Fuente: FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. Los sumideros de carbono a nivel local. 2011. p. 24.

Según el tipo de bosque, se almacena más o menos carbono; se encuentra el bosque tropical, el boreal o taiga y el templado, a continuación se hará una explicación de cada uno.

5.3.1 Bosque tropical. Son los que almacenan más carbono, hay secos y húmedos. Los secos se definen como "(...) aquella formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua y que se distribuye entre los 0-1000 m de altitud; presenta temperatura superiores a los 24°C (piso térmico cálido) y precipitaciones entre los 700 y 2000 mm anuales, con uno o dos periodos marcados de sequía al año"¹⁶¹, se encuentran en tierras bajas y presentan estaciones de fuertes lluvias, suelen estar amenazados, puesto a que tiene suelos relativamente fértiles que sirven para otras actividades como la producción agrícola, ganadera, minería, entre otras. Según Pizano¹⁶², tiene una biodiversidad única en fauna y flora, los cuales se han adaptado a condiciones de estrés hídrico;

¹⁶¹ ESPINAL, L.S. Geografía ecológica del departamento de Antioquia. En: Revista de la Facultad Nacional de Agronomía. Vol. 38, No°.1. 1985. p. 24-39; MURPHY, P.G y LUGO, A.E. Ecology of tropical dry forest. En: Annals Review of Ecology and Systematics. Vol. 17. 1986. P. 67-68, citado por Instituto Alexander von Humboldt (IAVH). El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia. 1998. 24p.

¹⁶² PIZANO, Camila, *et al.* Bosques secos tropicales en Colombia. . [En línea]. [14 marzo de 2017] disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/proyectos/en-desarrollo/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>

ofrece servicios fundamentales como lo es la retención de suelos, la regulación hídrica, disponibilidad de agua y nutrientes, y la captura de carbono.

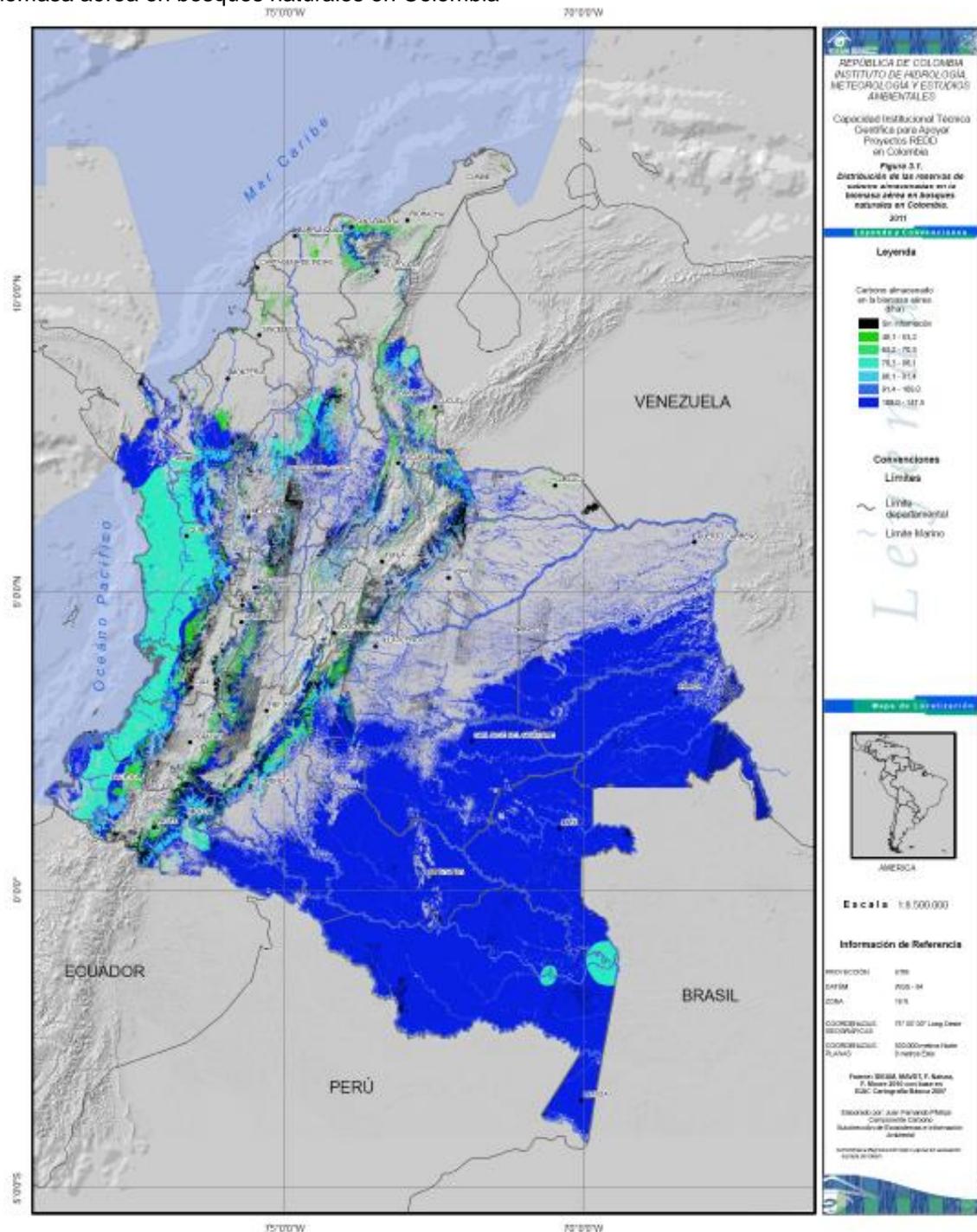
Los bosques tropicales húmedos, según Ofosu¹⁶³, representan casi un 25% de la superficie de los bosques del mundo, allí la precipitación anual es mayor a los 1.000 mm, la mayoría de ellos se encuentran en América, aproximadamente un 40%. Así como el seco, el húmedo cumple funciones como es la producción, producción y conservación de la diversidad biológica y de los recursos hídricos, también capturan carbono de la atmósfera.

El bosque tropical más grande del mundo es el de la Amazonia, el cual comprende parte de Colombia, Brasil, Bolivia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Guyana, Surinam y la Guayana Francesa; este trae beneficios para el clima, la gente y el planeta. Por esa razón es un área protegida, y además según la WWF¹⁶⁴, al mismo tiempo de luchar contra el cambio climático, ayuda a mitigar sus impactos, asegura provisión de servicios ecosistémicos y protege la biodiversidad, en la figura 33 se encuentra un mapa de Colombia donde se evidencia la distribución de las reservas de carbono almacenadas en los bosques naturales, se localiza que de color azul rey se encuentra sombreada la parte de la Amazonia, que según sus convenciones es donde se encuentra mayor cantidad de carbono en toneladas por hectárea.

¹⁶³ OFOSU-ASIEDU. A. El intercambio de experiencias y situación del conocimiento sobre la ordenación forestal sostenible de los bosques tropicales húmedos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, Brasil. p. 249-267.

¹⁶⁴ WORLD WILDLIFE FUND (WWF). Países Amazónicos se unen para proteger el bosque tropical más grande del mundo. [En línea]. [14 marzo de 2017] disponible en: <http://www.wwf.org.co/?287472/Paises-Amazonicos-se-unen-para-proteger-el-bosque-tropical>

Figura 33. Distribución de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales en Colombia



Fuente: IDEAM, MAVDT, F. Natura, F. Moore 2010 con base en IGAC Cartografía Básica 2001, citado por PHILLIPS, J.F. et al. Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 68p.

5.3.2 Bosque boreal o taiga. Es una inmensa masa forestal que forma un anillo en el hemisferio norte donde limita con la tundra en países como Canadá, Alaska, Rusia y países escandinavos, como se muestra en la figura 34. La temperatura en verano, según García¹⁶⁵ está entre aproximadamente 10-25°C, durante uno o cuatro meses, mientras que en el invierno puede llegar a tener temperaturas menores a 0°C durante seis o más meses al año.

De acuerdo a Greenpeace¹⁶⁶, la biodiversidad es reducida, en cuanto a la flora, dominan los pinos y alerces; respecto a la fauna, allí viven varias especies de las cuales algunas se encuentran en peligro como lo es el bisonte de bosque, el tigre siberiano, el águila calva, el oso pardo, entre otros, la mayoría se adapta para hibernar o estar en madrigueras en el invierno; otra parte de la vegetación que cubre el suelo es principalmente musgos, líquenes y setas, los anteriores pueden crecer directamente en el suelo o tener raíces superficiales, también pueden sobrevivir al frío, con poca agua y luz. En otras palabras, como se encuentra en el glosario del IPCC, el bosque boreal o taiga es:

Extensión boscosa de pinos, piceas, abetos y alerces que abarca desde la costa oriental de Canadá hacia el oeste, hasta Alaska, y que continúa desde Siberia, atravesando toda Rusia, hasta la llanura europea. El clima en ella es continental, con inviernos prolongados y muy fríos (hasta 6 meses con temperaturas medias inferiores al punto de congelación), y veranos cortos y frescos (entre 50 y 100 días sin heladas). La precipitación aumenta en los meses de verano, aunque en términos anuales sigue siendo escasa. En tales extensiones, las bajas tasas de evaporación pueden crear un clima húmedo¹⁶⁷.

En este gran pulmón del planeta como se nombró anteriormente y publica LaRed21¹⁶⁸, se encuentra poca biodiversidad, pero la fauna que habita allí, no se ve con facilidad en otro lado y se encuentra cerca de 20.000 especies vegetales, lo que se traduce al 25% de los árboles de todo el mundo. Por esa razón es una de las fuentes de madera más importantes del planeta, lo que amenaza la zona y con ello, su biodiversidad, además de la creciente demanda de recursos de

¹⁶⁵ GARCÍA, Juan Carlos. El bosque boreal de coníferas. Universidad de Cantabria. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/tema-3/3.3.4-el-bosque-boreal-de-coniferas>

¹⁶⁶ GREENPEACE. 9 datos curiosos sobre el Gran Bosque Boreal. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/Blog/9-datos-curiosos-sobre-el-gran-bosque-boreal/blog/58245/>

¹⁶⁷ GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Anexo I, Glosario. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-annex-sp.pdf>

¹⁶⁸ LA RED 21. Bosque Boreal, uno de los pulmones más grandes del planeta. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.lr21.com.uy/ecologia/1315649-bosque-boreal-taiga-peligro-amenazas-cambio-climatico>

minería y del desarrollo urbano. Por lo anterior, Cardozo¹⁶⁹ realizó un estudio el cual se publicó en Nature el cual sugiere que la absorción de CO₂ que se produce en la primavera, se anula con la liberación del gas en otoño y que la temperatura ha aumentado 0.8°C en primavera y 1.1°C en otoño.

Contrariamente a como pensaban científicos en los años 60's, Neofronteras¹⁷⁰ comunica que los bosques de bastantes años son buenos sumideros de carbono, antes se decía que el balance de carbono era neutro, ya que emitían la misma cantidad que la que absorbían. Pero según un estudio más reciente, aproximadamente del año 2008, si se llegan a perturbar los bosques el dióxido de carbono puede volver a la atmósfera, pero si se dejan quietos son un muy buen sumidero, puesto a que aunque las ramas de los árboles se descompongan y se devuelva el CO₂, el árbol sigue creciendo y almacenando carbono, pueden capturar cerca de 1.300.000.000 toneladas de carbono anualmente.

Figura 34. Bosque boreal



Fuente: Mapas online blog. El más grande p-patch: El Bosque Boreal es verde Corona de la Tierra. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.mobes.info/article/6000455449/>

¹⁶⁹ CARDOZO, Lenin y MÉNDEZ, Hugo. Bosques boreales. La corona verde del planeta tierra, sus pobladores, clima, fauna, y flora. Maracaibo: Erato, 2016. 150p.

¹⁷⁰ NEOFRONTERAS. Los bosques primarios son sumideros de carbono. En: NeoFronteras. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://neofronteras.com/?p=1275>

5.3.3 Bosque templado. Son ecosistemas de subhúmedos a templado húmedos, con abundante precipitación, tiene temperaturas moderadas y cuatro estaciones, entre los que se encuentran inviernos fríos y veranos prolongados, se caracterizan por el cambio de color de las hojas de los árboles; se encuentran entre 2.000 y 3.400 metros sobre el nivel del mar, producen madera y otros productos forestales.

Según la Universidad Estatal de Campinas¹⁷¹, producen hojas, frutas, semillas en abundancia, lo que es el alimento para los animales en el verano; en el otoño, la temperatura disminuye, los días se hacen más cortos, las hojas de los árboles cambian de color y caen; en el invierno, las hojas muertas forman un lecho debajo de la nieve y los árboles permanecen estériles, en esta estación, animales emigran a climas cálidos o hibernan e incluso otros desarrollan un pelaje especial para soportar las temperaturas; luego en primavera cuando los días son más largos y sube la temperatura, los árboles producen nuevas hojas y flores, los animales vuelven y la población de insectos crece rápidamente.

Asimismo, Academia¹⁷² informa que los árboles que predominan son el roble, arce, olmo, nogal, coníferas, entre otros, también se encuentran musgos, helechos, hierbas, arbustos y enredaderas; por su variedad, la altura de los bosques es variable, puede encontrarse entre 8-25 metros pero puede alcanzar los 40 metros. En cuanto a la fauna, se encuentran aves como la golondrina, atrapa moscas, el carpintero, búhos, ratones, ardillas conejos, venados, osos, etc.

Una de las mayores amenazas según UPSOCL¹⁷³, es la deforestación para la agricultura y la industria maderera, por ello, se firmó un documento el cual promete encontrar un equilibrio entre la preservación del ecosistema y las actividades comerciales de la zona, del 70% del Bosque del Gran Oso o Great Bear Rainforest, el bosque templado más grande del mundo, ubicado en Canadá. Éste es hogar de cedros milenarios, animales como orcas, salmones, lobos grises, águilas y osos.

Según lo anterior, se concluye que los bosques tropicales son los que mayor cantidad de carbono acumulan, seguido por los boreales o taigas y los templados, así como se evidencia en la figura 35; la cantidad de carbono en los tropicales se

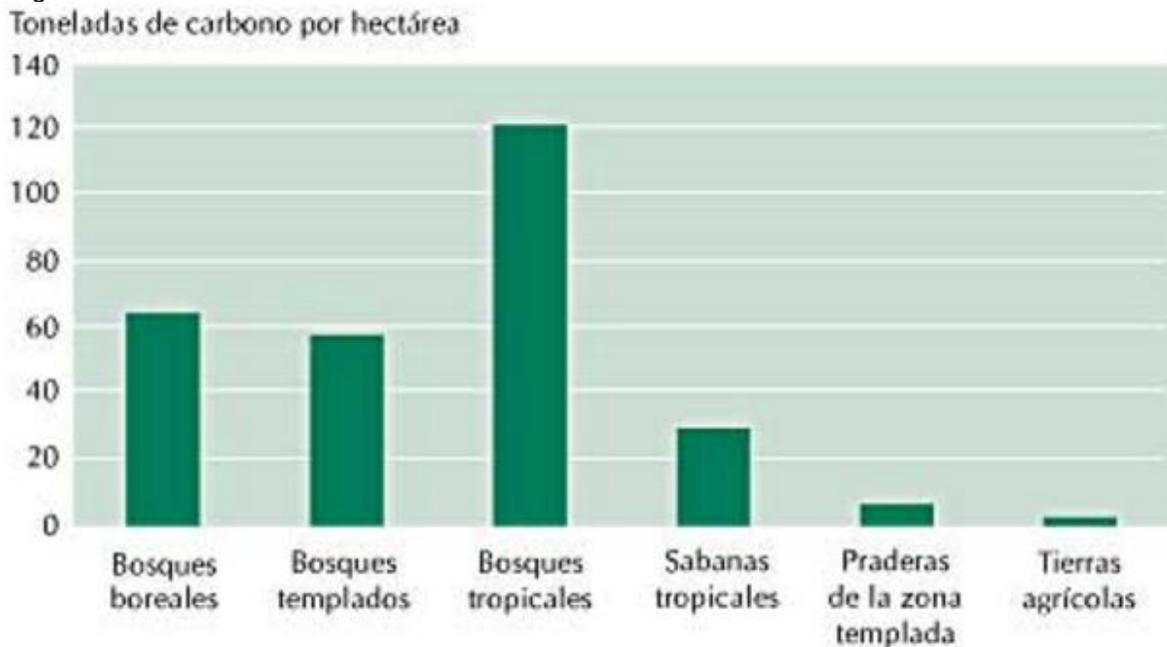
¹⁷¹ UNIVERSIDAD ESTATAL DE CAMPINAS. Biomas forestales templados. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/esp/esp-15.htm>

¹⁷² ACADEMIA. BOSQUE TEMPLADO. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: http://www.academia.edu/5293714/Bosque_Templado

¹⁷³ UPSOCL. El bosque templado más grande del mundo acaba de ser salvado. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.upsocl.com/verde/el-bosque-templado-mas-grande-del-mundo-acaba-de-ser-salvado/>

encuentra distribuido en partes iguales entre la vegetación y el suelo, en los boreales se encuentra en forma de materia orgánica en el suelo.

Figura 35. Densidad de carbono existente encima del suelo en determinados tipos de vegetación



Fuente: IPCC, 2000. [En línea]. [14 marzo de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/y0900s/y0900s06.htm>

Además, un estudio dirigido por la NASA¹⁷⁴ muestra que los bosques tropicales están absorbiendo más CO₂ del que se pensaba, se estima que absorben 1.400 millones de toneladas métricas de una absorción global de 2.500 millones, lo anterior es una buena noticia ya que la capacidad de los bosques boreales está disminuyendo, mientras que los tropicales pueden seguir funcionando como sumideros de carbono durante muchos años más.

5.4 PASTIZALES

Son ecosistemas con una vegetación abierta donde existen especies herbáceas las cuales alimentan a los animales herbívoros. Usualmente estas zonas son de pastoreo, donde la precipitación se encuentra entre 250 y 800 mm, con elevada evaporación y sequías extremas; en el planeta Tierra, Laureano¹⁷⁵ calcula que los pastizales cubren aproximadamente entre el 31% y 43% de la superficie terrestre,

¹⁷⁴ NASA. Buenas noticias sobre los bosques y el dióxido de carbono. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/31dec_forests

¹⁷⁵ LAUREANO, Raquel; FERNÁNDEZ, María y LEDESMA, Juan. Op. Cit., p. 125-126.

lo que se traduce a de 41 a 56 millones de km²; debido a su extensión, estos albergan un tercio del carbono que se encuentran en los ecosistemas terrestres.

En otras regiones del mundo se conoce como estepa, pampa, sabana o pradera y se encuentra en ciertas áreas de América del Norte, América del Sur y Eusaria como se muestra en la figura 36, Biodiversidad¹⁷⁶ dice que son zonas de transición, ya que se encuentra entre el desierto y los biomas forestales; allí predominan los pastos con pocos árboles y arbustos, tiene temperaturas medias anuales de entre 12-20°C. La característica más importante según Rice¹⁷⁷ es que todo el año se encuentran cubiertos por pastos y como se nombró anteriormente, también hay presencia de árboles y arbustos.

Según Belluscio¹⁷⁸ basándose en un estudio de la FAO, los pastizales aunque a simple vista se ven como tierras abandonadas, son uno de los ecosistemas más grandes del mundo y colaboran a la subsistencia de más de 800 millones de personas, además, contribuyen al almacenamiento de agua y carbono; inclusive, como informa Biopedia¹⁷⁹, se cree que existen por lo menos 80 especies de animales como coyotes, lince, bisontes americanos, lobos grises, gatos monteses, variedad de insectos, también más de 300 especies de aves que viven allá o migran.

Los pastizales tienen un gran potencial sin explotar para mitigar el cambio climático según un informe de la FAO¹⁸⁰; los pastizales pueden absorber y almacenar más CO₂ que los bosques si se utilizan adecuadamente. Son cerca de 3.400 millones de hectáreas, el 30% que cubre la superficie terrestre de solo pastizal, donde gran parte se utiliza para pastoreo y éstas almacenan el 30% del carbono del suelo a nivel mundial, más el porcentaje contenido en árboles, matorrales, arbustos y hierbas.

¹⁷⁶ BIODIVERSIDAD. Pastizales. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales.html>

¹⁷⁷ RICE, William. Los pastizales africanos. California: Teacher Created Materials, Inc., 2005. 29p. ISBN: 0-7439-0048-0.

¹⁷⁸ BELLUSCIO, Ana. La importancia de la conservación de pastizales. [En línea]. [24 marzo de 2017] disponible en: <http://www.conicet.gov.ar/la-importancia-de-la-conservacion-de-pastizales/>

¹⁷⁹ Biopedia. Pastizales o praderas. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biopedia.com/pastizales-praderas/>

¹⁸⁰ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Combatir el cambio climático con los pastizales. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/38943/icode/>

Figura 36. Pastizales en el mundo



Fuente: BLOGSPOT. Pastizal. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://maxmixawesome.blogspot.com.co/2016/05/pastizal.html>

Un peligro y amenaza de los pastizales además del sobrepastoreo, según Cannizzaro¹⁸¹, son los incendios; estos se deben a que tienen largos periodos de sequía, la mayoría de vegetación es pasto, éste al crecer, es biomasa potencialmente incendiable y al ser terrenos usualmente planos, el viento circula con mayor intensidad lo que ayuda a propagar el incendio; en contraparte, de acuerdo a Rice¹⁸², los incendios no destruyen la hierba y ésta puede volver a crecer, lo anterior, porque las raíces se encuentran protegidas por el suelo; aunque las otras plantas y árboles si se queman, por esa razón es que se encuentra más pasto que el resto de vegetación en los pastizales.

5.5 HUMEDALES

Son un ecosistema intermedio entre el medio acuático y el terrestre, tienen partes húmedas, semi-húmedas y secas; cuenta con flora y fauna diferente a la del resto de ecosistemas, ya que se encuentran varias especies endémicas y en peligro de extinción, además de ello, son el albergue de aves en sus migraciones. Según la

¹⁸¹ CANNIZZARO, Alejandro. Incendios de pastizales: prevenir, conocer y controlar. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: <http://www.conicet.gov.ar/incendios-de-pastizales-prevenir-conocer-y-controlar/>

¹⁸² RICE, William. Los pastizales africanos. Op. Cit., p. 8-9.

Pontificia Universidad Católica de Chile¹⁸³, poseen varias funciones, al gozar una gran capacidad de absorción hace que retenga el exceso de agua durante los periodos de lluvia, reservándola para los secos, también reducen la contaminación del agua, puesto a que las plantas lacustres, es decir, de lagos, retienen sedimentos y metales pesados.

Existen diferentes tipos de humedales, varía según su localización y tipo de vegetación, se encuentran los marinos y estuarinos, los lacustres y palustres como lo dice Marín¹⁸⁴:

- Marinos y estuarinos: ubicados en sobre la zona costera, su entrada de agua es principalmente salada o salobre que es la mezcla entre agua dulce y salada
- Lacustres: situados en zonas represadas como lagos y a las orillas de estos
- Palustres: se encuentran en el borde de los ríos, lagunas de agua dulce o planicies inundables, la entrada de agua es únicamente dulce.

Los humedales según Marín¹⁸⁵, cumplen con distintas funciones como lo es ser el hábitat de gran variedad de fauna acuática, terrestre y de aves, producen productos que se usan como materia prima para construcción, medicina, alimento y ornamentales, regulan los procesos ecológicos esenciales para la vida como lo son el hidrológico y el de carbono. Razón por la cual Roa-García¹⁸⁶ dice que son globalmente considerados importantes por la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y de la calidad del agua.

Pueden reciclar y almacenar el carbono como se muestra en la figura 37, donde las plantas toman el CO₂ a través de sus hojas para realizar la fotosíntesis, convirtiéndolo de gas a sólido (biomasa), parte de ésta puede permanecer como parte de la vegetación viva desde un año hasta décadas. Cuando mueren las

¹⁸³ PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Humedales. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: http://agronomia.uc.cl/component/com_sobipro/Itemid,232/fid,218.1060/sid,87/task,download.file/

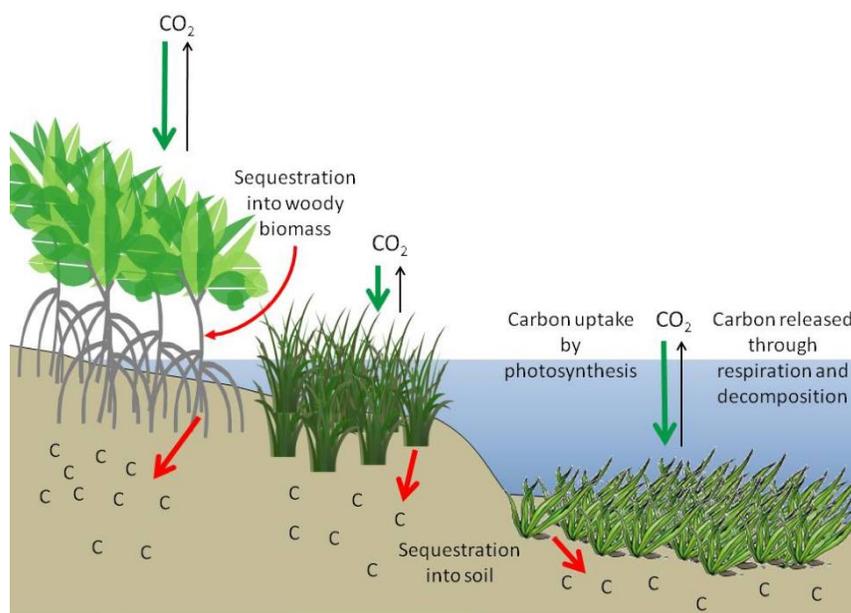
¹⁸⁴ MARÍN, José y HERNÁNDEZ, Elizabeth. Los humedales, sus funciones y su papel en el almacenamiento de carbono atmosférico. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/172-los-humedales-sus-funciones-y-su-papel-en-el-almacenamiento-del-carbono>

¹⁸⁵ MARÍN, José y HERNÁNDEZ, Elizabeth. Los humedales, sus funciones y su papel en el almacenamiento de carbono atmosférico. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/172-los-humedales-sus-funciones-y-su-papel-en-el-almacenamiento-del-carbono>

¹⁸⁶ ROA-GARCÍA, María y BROWN, Sandra. Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río barbas (Quindío, Colombia). *Caldasia*. Vol. 38, No. 1 (Ene, 2016); p. 117-135. ISSN: 2357-3759.

plantas y bacterias, según Warner¹⁸⁷, los restos caen sobre la superficie del humedal o en el fondo de la columna de agua, donde la descomposición rompe la biomasa y la desintegra en sedimentos ricos en materia orgánica formando una capa la cual va engrosándose con el pasar del tiempo, por ejemplo, como informa Notas del medio ambiente¹⁸⁸, en México hay capas que pueden alcanzar hasta tres metros de espesor, los sedimentos pueden permanecer por cientos o miles de años, se dice que capturan 200 toneladas métricas al año, lo que equivale al 50-90% del carbono que se encuentra en los suelos.

Figura 37. Esquema del almacenamiento de carbono en los humedales



Fuente: NOTAS DEL MEDIO AMBIENTE. Los humedales costeros, aliados contra el calentamiento global. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.notasdelmedioambiente.com/los-humedales-costeros-aliados-contra-el-calentamiento-global/>

Según la Convención sobre los Humedales, también llamada Convención de Ramsar¹⁸⁹, que es un tratado intergubernamental que tiene como misión trabajar en pro de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos, los humedales son un ecosistema de gran relevancia para la mitigación y adaptación al cambio climático, también dice que los humedales ya degradados son fuente

¹⁸⁷ WARNER, Barry; ARAVENA, Ramón y MORENO-CASASOLA, Patricia. Op. Cit., p. 311-313.

¹⁸⁸ NOTAS DEL MEDIO AMBIENTE. Los humedales costeros, aliados contra el calentamiento global. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.notasdelmedioambiente.com/los-humedales-costeros-aliados-contra-el-calentamiento-global/>

¹⁸⁹ RAMSAR. La convención de RAMSAR y su misión. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convenci%C3%B3n-de-ramsar-y-su-misi%C3%B3n>

significativa de emisiones de carbono a la atmósfera y su restauración ofrecería un rendimiento de hasta 1.000 veces superior al de las alternativas de mitigación de las emisiones de CO₂, es por ello que las partes contratantes de Ramsar¹⁹⁰ reconocen que la conservación, restauración y el uso racional de los humedales son de carácter urgente.

Los humedales al igual que los anteriores sumideros de carbono naturales, corren riesgos, por ejemplo, como dice Warner¹⁹¹, los marinos son vulnerables al incremento del nivel del mar, hace que los cuerpos de agua se extiendan y la línea de la costa migre tierra adentro.

Si se continúa con el ritmo actual o si se llegase a incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero, los sumideros de dióxido de carbono podrían saturarse, podrían dejar de cumplir su función e incluso convertirse en fuentes de carbono, contribuyendo a acelerar el calentamiento global en vez de mitigarlo; es por ello, que se hace necesaria la implementación de tecnología en la industria para que ayude a los sumideros naturales, la tecnología se llama Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) y puede ser de gran ayuda tanto en el sector energético como en el de construcción como se muestra a continuación.

¹⁹⁰ RAMSAR. Los humedales y la reunión sobre el cambio climático de la COP15 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Copenhague, 7 a 18 de diciembre de 2009). Nota informativa del Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) y la Secretaría a las Partes Contratantes. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: http://archive.ramsar.org/pdf/strp/strp_briefing_climate_2009_s.pdf

¹⁹¹ WARNER, Barry; ARAVENA, Ramón y MORENO-CASASOLA, Patricia. Op. Cit., p. 305-306.

6. SECTORES INDUSTRIALES Y PROCESOS GENERADORES DE DIÓXIDO DE CARBONO

Como se ha mencionado anteriormente, los sectores industriales son grandes contribuyentes en cuanto a gases de efecto invernadero se trata, en especial el dióxido de carbono, el cual es el mayor causante del calentamiento global. Actualmente, con el mundo globalizado, la industria no le pone un alto a los procesos por más contaminantes que sean, ya que según Club Planeta¹⁹², son grandes representantes del producto interno bruto (PIB) de cada país, el cual es el valor monetario de los bienes y servicios producidos en un periodo de tiempo determinado y sirve como indicador para medir la competitividad de las empresas; es por ello que es de gran importancia saber cuáles son, para poder implementar medidas que ayuden a mermar los efectos negativos que traen consigo. En este capítulo pretende identificar los sectores industriales y procesos que producen CO₂.

6.1 SECTOR CONSTRUCCIÓN - CEMENTO

Este sector es uno de los motores e impulsores de la economía de cualquier país, por ejemplo, según Construdata¹⁹³, en Colombia tiene participación de 2.35% en el PIB total, ha sido gran generador de empleo, proporciona elementos de bienestar básicos; presenta ciclos de expansión y contracción dependiendo de la demanda, las tasas de interés del mercado financiero, de las políticas y disponibilidad de recursos financieros. Para lograr lo anterior, de acuerdo con la Universidad del Valle de México¹⁹⁴, el sector construcción utiliza insumos provenientes de otras industrias tales como la del acero, hierro, cal, madera, aluminio, arena, asfalto, cemento, entre otras. La última es de gran importancia, el cemento, ya que acorde a la Universidad de Piura¹⁹⁵, el sector toma en cuenta su comportamiento y el 70% de su venta representa el 95% del PIB de la construcción, así que a mayor venta de cemento, mayor crecimiento del producto interno bruto de la construcción.

¹⁹² CLUB PLANETA. Producto Interno Bruto. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.economia.com.mx/producto_interno_bruto.htm

¹⁹³ CONSTRUDATA. Características generales del sector construcción-Colombia. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.construdata.com/BancoConocimiento/o/oit_colombia_caracteristicas/oit_colombia_caracteristicas.asp

¹⁹⁴ UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO (UVM). Tendencias de la tecnología de información: Sector construcción, 2013. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: <https://sites.google.com/site/ittrends2013/sector-construccion>

¹⁹⁵ UNIVERSIDAD DE PIURA. Análisis del Sector Construcción. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_97_204_59_903.pdf

Como lo dice Torres¹⁹⁶, en Colombia, las principales empresas de la industria del cemento son CEMEX, creada en México en 1906, el Grupo ARGOS que nació como un sindicato antioqueño en el 1934 y el Grupo HOLCIM, fundado en Suiza en 1912. En cuando a la industria a nivel global, China es el mayor productor, con un 54% de producción mundial y ha tenido crecimiento anualmente, no solamente China sino también otros países gracias a que del mismo modo, el consumo mundial ha incrementado, en el año 2008 fue de 2.4%, en el 2009 de 5.9% y 2010 un 9.9%, notándose una tendencia arribista. En la tabla 2 se muestra la producción y consumo de cemento para los años 2010, 2011 y 2012; donde Brasil es el mayor productor y consumidor, seguido por México, Argentina y Colombia, asimismo se evidencia una tendencia de incremento tanto en producción como en consumo de cemento con el pasar de los años.

El sector cementero en Colombia, según Latorre¹⁹⁷, tiene un lugar importante en la economía y tiene relación directa con la construcción, en los últimos años ha tenido un comportamiento volátil, a finales de los 90's tuvo un gran incremento y luego con la crisis del 2005 hubo un descenso, después de eso ha tenido un crecimiento persistente.

Tabla 2. Producción y consumo de cemento en los años 2010, 2011 y 2012 (En miles de toneladas)

| País | 2010 | | 2011 | | 2012 | |
|--------------------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | PRODUCCIÓN | CONSUMO | PRODUCCIÓN | CONSUMO | PRODUCCIÓN | CONSUMO |
| Argentina | 10,423 | 10,194 | 11,592 | 11,386 | 10,716 | 10,456 |
| Barbados | 229 | 112 | 223 | 103 | 175 | 98 |
| Bolivia | 2,414 | 2,449 | 2,658 | 2,689 | 2,714 | 2,915 |
| Brasil | 59,117 | 60,008 | 64,093 | 64,972 | 68,809 | 69,324 |
| Chile | 4,417 | 4,456 | 4,65 | 5,071 | 5,044 | 5,69 |
| Colombia | 9,505 | 8,921 | 10,779 | 10,155 | 10,925 | 10,496 |
| Costa Rica | 1,5 | 1,275 | 1,4 | 1,35 | 1,4 | 1,35 |
| Cuba | 1,73 | 1,43 | 1,736 | 1,298 | 1,825 | 1,372 |
| Ecuador | 5,287 | 5,287 | 5,706 | 5,706 | 6,025 | 6,025 |
| El Salvador | 1,29 | 1,4 | 1,32 | 1,43 | 1,38 | 1,48 |

¹⁹⁶ TORRES, David. Comportamiento de la industria del cemento y su incidencia en el crecimiento económico colombiano. Cartagena, 2015, p.36-40. Trabajo De Grado realizado para obtener el título de Economista. Universidad de Cartagena. Facultad de ciencias económicas. Programa de Economía.

¹⁹⁷ LATORRE, Andrés. La industria del cemento en Colombia, determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005). Monografía en Ciencias Económicas–Facultad de Ciencias Económicas, Pontificia Universidad Javeriana. 2008. p. 4.

Tabla 2. (Continuación)

| País | 2010 | | 2011 | | 2012 | |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | PRODUCCIÓN | CONSUMO | PRODUCCIÓN | CONSUMO | PRODUCCIÓN | CONSUMO |
| Guadalupe y Martinica | 441 | 440 | 431 | 432 | 435 | 434 |
| Guatemala | 2,794 | 2,794 | 2,85 | 2,85 | 2,88 | 2,88 |
| Honduras | 1,6 | 1,5 | 1,62 | 1,5 | 1,73 | 1,58 |
| Jamaica | 723 | 696 | 766 | 724 | 760 | 700 |
| México | 34,503 | 33,9 | 35,398 | 34,416 | 36,8 | 35,6 |
| Nicaragua | 600 | 600 | 700 | 700 | 730 | 730 |
| Panamá | 1,491 | 1,597 | 1,766 | 1,806 | 2,252 | 2,4 |
| Paraguay | 1,1 | 1,64 | 820 | 1,46 | 800 | 1,28 |
| Perú | 8,298 | 8,496 | 8,499 | 8,838 | 9,847 | 10,176 |
| Puerto Rico | 697 | 771 | 717 | 811 | 743 | 835 |
| República Dominicana | 4,1 | 3,1 | 3,8 | 2,8 | 4 | 2,6 |
| Trinidad y Tobago | 791 | 548 | 827 | 535 | 654 | 512 |
| Uruguay | 834 | 664 | 968 | 767 | 872 | 829 |
| Venezuela | 7,12 | 7,12 | 7,76 | 7,76 | 8,28 | 8,28 |
| TOTAL | 161,004 | 159,398 | 171,079 | 169,559 | 179,796 | 178,042 |

Fuente: FEDERACIÓN INTERAMERICANA DE CEMENTO (FICEM). Informe estadístico 2013. p. 23-25.

El cemento es según expresa Latorre¹⁹⁸, una mezcla de arcilla molida y otros materiales en polvo que después de su debido proceso, adquiere propiedades adherentes; existen de varias clases dependiendo del porcentaje de dosificación que se le aplique de cada materia prima, las más comunes son el cemento Portland tipo 1, 2, 3, 4 y 5; los más comercializados son del tipo 1 y 3, donde el 1 es utilizado principalmente en estructuras y obras; el 3 en prefabricados, donde se requiere un endurecimiento rápido y buena resistencia.

Conforme a Latorre¹⁹⁹, las materias primas para la elaboración del cemento son caliza, arcilla, yeso, escoria y puzolana; la caliza es la principal para la fabricación y del yeso depende controlar el tiempo de fraguado, el cual es el proceso de endurecimiento y pérdida de elasticidad. Su proceso de fabricación consiste en extraer las materias primas de una cantera las cuales se trituran dando como resultado partículas pequeñas, después se almacenan para homogenizarlas, luego se muele para evitar su descomposición. Desde esa etapa, la temperatura del material incrementa progresivamente hasta alcanzar temperaturas extremas, más de 1450°C en el horno, donde se producen calcinaciones y el *clinker*; éste se

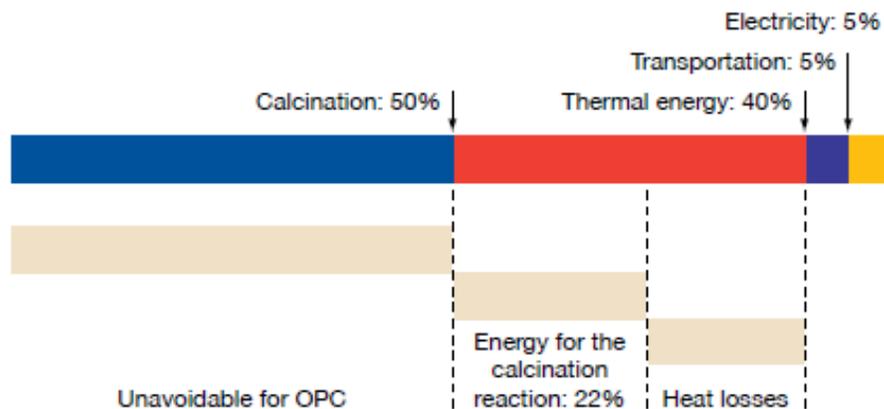
¹⁹⁸ *Ibíd.*, p. 6-8.

¹⁹⁹ *Ibíd.*, p.12.

enfria a entre 100-200°C para luego almacenarlo en un buffer. Como pasos concluyentes, según Müller²⁰⁰, se tiene la adición de yeso, para el cemento portland es el 5%, también la molienda para un acabado fino y finalmente, se almacena.

El proceso de elaboración de cemento, de acuerdo a la WBCSD²⁰¹, genera emisiones de gases de efecto invernadero, en especial de CO₂; de hecho se estimó en el año 2000, que la producción de una tonelada de cemento, libera aproximadamente 0.87 toneladas de CO₂. En el año 2006, la producción de cemento contribuyó a alrededor del 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂, lo que es igual al 6% del total de las emisiones de GEI relacionadas a las actividades del ser humano. Para ser más exactos, en algunos procesos se emiten más que en otros; durante la calcinación que es cuando la caliza se transforma en cal, dice Müller²⁰², se emite alrededor del 50% del CO₂, un 40% es por la quema de combustible para brindar la energía térmica necesaria para que ocurra la calcinación, 5% son indirectas por la utilización de electricidad para operar la planta y el otro 5% restante, es emitido por actividades como la extracción de materias primas y el transporte de las mismas, lo anterior se ilustra en la figura 38 a continuación.

Figura 38. Fuentes mundiales promedio de CO₂ en el proceso de producción de Cemento Portland Ordinario (OPC) – proceso considerado: horno rotativo seco con pre-calentador/pre-calcinador



Fuente: MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, p. 18

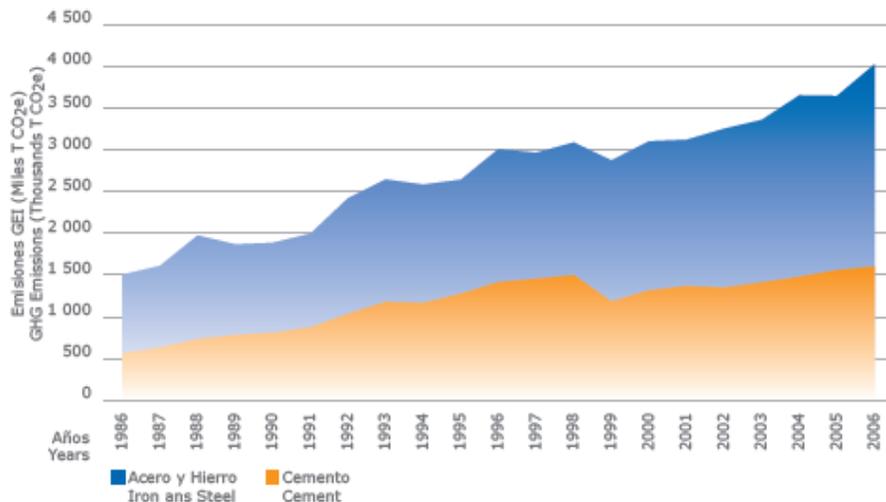
²⁰⁰ MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, 101p.

²⁰¹ WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD)-Batelle. The Cement Sustainability Initiative – Substudy 8: Climate Change. [En línea]. [1 marzo de 2002] disponible en: <http://www.wbcd.org/web/publications/batelle-full.pdf> citado por MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, p. 17.

²⁰² MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. Op. Cit., p. 18.

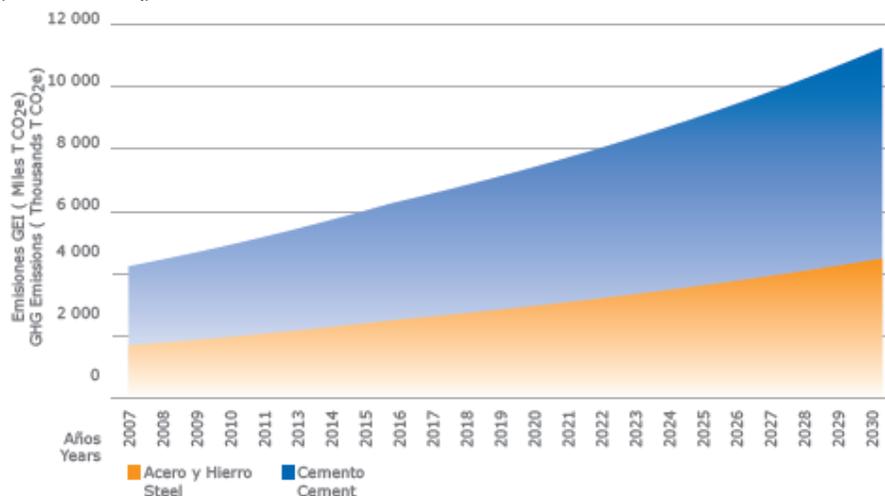
Müller²⁰³ proyecta que para el periodo 1990-2050 las emisiones relacionadas con esta industria, la cementera, incrementen un 260%, en la figura 39 se muestran las emisiones en procesos industriales, en la figura 40 se hace una proyección hasta el año 2030 de las emisiones de GEI; lo que respecta al acero y hierro se encuentra de color azul, y el cemento de color naranja.

Figura 39. Emisiones de GEI en procesos industriales (MTCO₂eq)



Fuente: O'RYAN, Raúl; DÍAZ, Manuel y CLERC, Jacques. Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación. Santiago: Universidad de Chile. 2010. p. 19

Figura 40. Evolución de las emisiones de GEI asociadas a procesos industriales (MMTCO₂eq)



Fuente: O'RYAN, Raúl; DÍAZ, Manuel y CLERC, Jacques. Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación. Santiago: Universidad de Chile. 2010. p. 28

²⁰³ *Ibíd.*, p. 1.

Como se observa en la figura anterior, la 40, las emisiones de GEI asociadas a procesos industriales, incrementan casi 3 veces, alcanzando 11.300 toneladas de CO₂ anuales en el año 2030; razón por la cual diversos autores han pensado y comunicado opciones con las cuales se pueden reducir esas cantidades. Por ejemplo, según Muñoz²⁰⁴, se han establecido 5 opciones para reducir las emisiones que se nombran a continuación, teniendo en cuenta que si se llega a aplicar alguna por sí sola, no tendrá el efecto deseado a si se llegasen a utilizar todas o la gran mayoría:

1. Mejora de la eficiencia energética de algunas instalaciones.
2. Optimización de las adiciones.
3. Optimización del mix de combustibles fósiles.
4. Potenciación del uso de residuos como combustibles alternativos que reduzcan el consumo de combustibles fósiles tradicionales.
5. Investigación para fomentar el uso de nuevas materias primas que reduzcan la relación de emisión por la reacción química de la descarbonatación.

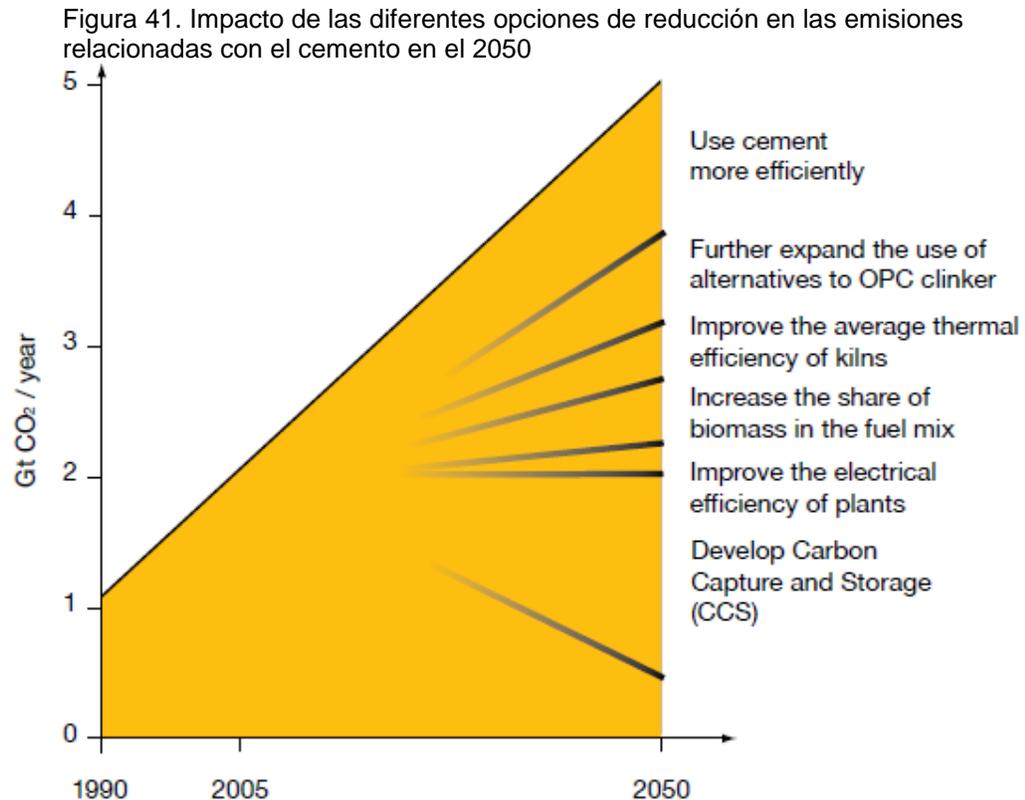
Asimismo, Müller²⁰⁵, tiene sus opciones para que la industria cementera se dirija al camino de bajo contenido de carbono, éstas se muestran a continuación y en la figura 41 se evidencia el impacto de cada una para el año 2050, siendo la opción 6 la de mayor efectividad:

1. Utilizar el cemento de manera eficiente: al reducir la necesidad de hormigón, mejorar la cualidad y calidad.
2. Ampliar el uso de aditivos y sustitutos: para producir cementos mezclados, también promover alternativas al cemento Portland.
3. Mejorar la eficiencia térmica de los hornos: fomenta y desarrolla reducciones de emisiones de CO₂.
4. Optimizar la eficiencia eléctrica de las plantas nuevas y existentes a través de la técnica de recuperación de calor residual.
5. Aumentar la participación de la biomasa en la mezcla de combustibles.

²⁰⁴ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 7.

²⁰⁵ MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. Op. Cit., p. 3-5.

6. Captura y Almacenamiento de Carbono: puede alcanzar el 60% de secuestro de CO₂ para el 2050 y sólo con 3000 plantas en todo el mundo, se puede suministrar la demanda de 5Gt de cemento.

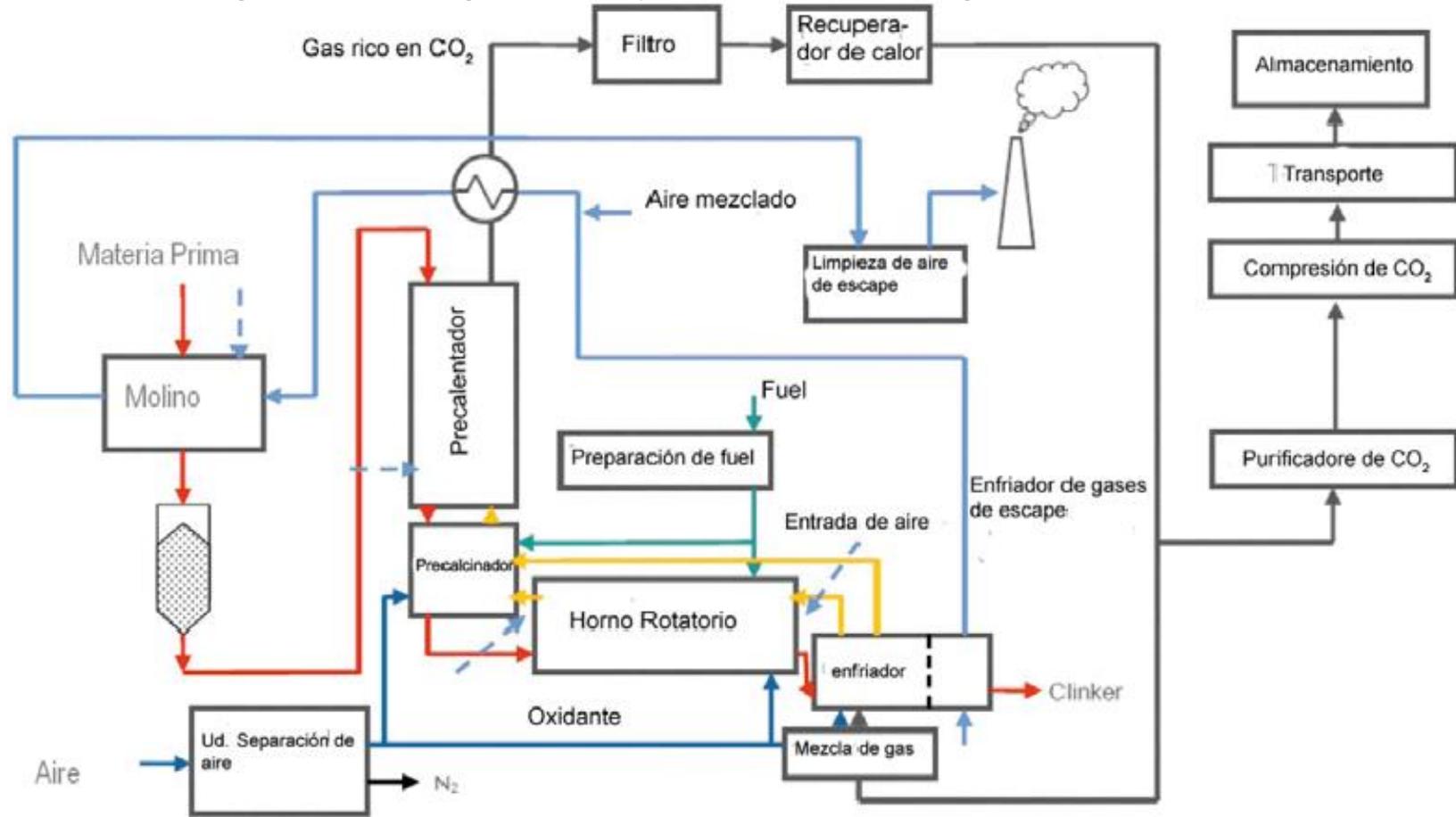


Fuente: MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, p. 69.

Al ser la captura y almacenamiento de carbono (CAC) la opción más eficiente según la figura anterior, la 41; se buscan características en la industria cementera para ver si es adecuada su utilización. Se encontraron las siguientes según Müller²⁰⁶, primero, el gas de escape tiene una concentración de CO₂ alta, alrededor de 14-34%, usualmente son las plantas modernas las que tienen alta concentración de este GEI, y segundo, la cantidad de CO₂ emitida por sitio es grande, aproximadamente 1.3Mt de CO₂ anuales para una planta de 4000 toneladas por día (tpd). Según MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José; depende la planta de producción de cemento se puede aplicar la tecnología de CAC en pre-combustión, oxicombustión y post-combustión; un ejemplo de la oxi-combustión en la industria se encuentra ilustrado en la figura 42. Aparte del sector de construcción, en especial la parte del cemento, existen otros sectores industriales los cuales también contribuyen con las emisiones de gases de efecto invernadero, como lo es el sector energético.

²⁰⁶ *Ibíd.*, p. 41.

Figura 42. Posible configuración de una planta de cemento con tecnologías de oxicomustión



Fuente: EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY (ECRA) citado por MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento. Agrupación de fabricantes de cemento de España, 2011. p. 39. ISBN 978-84-615-5702-8.

6.2 SECTOR ENERGÉTICO

Desde hace años la energía ha sido un factor importante para el desarrollo de las actividades del ser humano, desde cocinar, iluminación, transporte hasta abastecer ciudades enteras en sus diferentes formas y dimensiones. Pero cada proceso para la generación de energía produce contaminantes, en especial gases de efecto invernadero, lo que convierte a la industria energética en un gran contribuyente al cambio climático. Las emisiones de GEI en este sector, según el registro de emisiones y transferencias de contaminantes²⁰⁷, son el resultado de la producción, transformación, gestión y consumo de productos energéticos. En cuanto a las fuentes estacionarias, acorde al grupo consultivo de expertos²⁰⁸, dicen que son las que emiten contaminantes a la atmósfera provenientes de instalaciones o actividades establecidas en un solo lugar o área, comprenden actividades como la generación de electricidad, la extracción y refinado del petróleo.

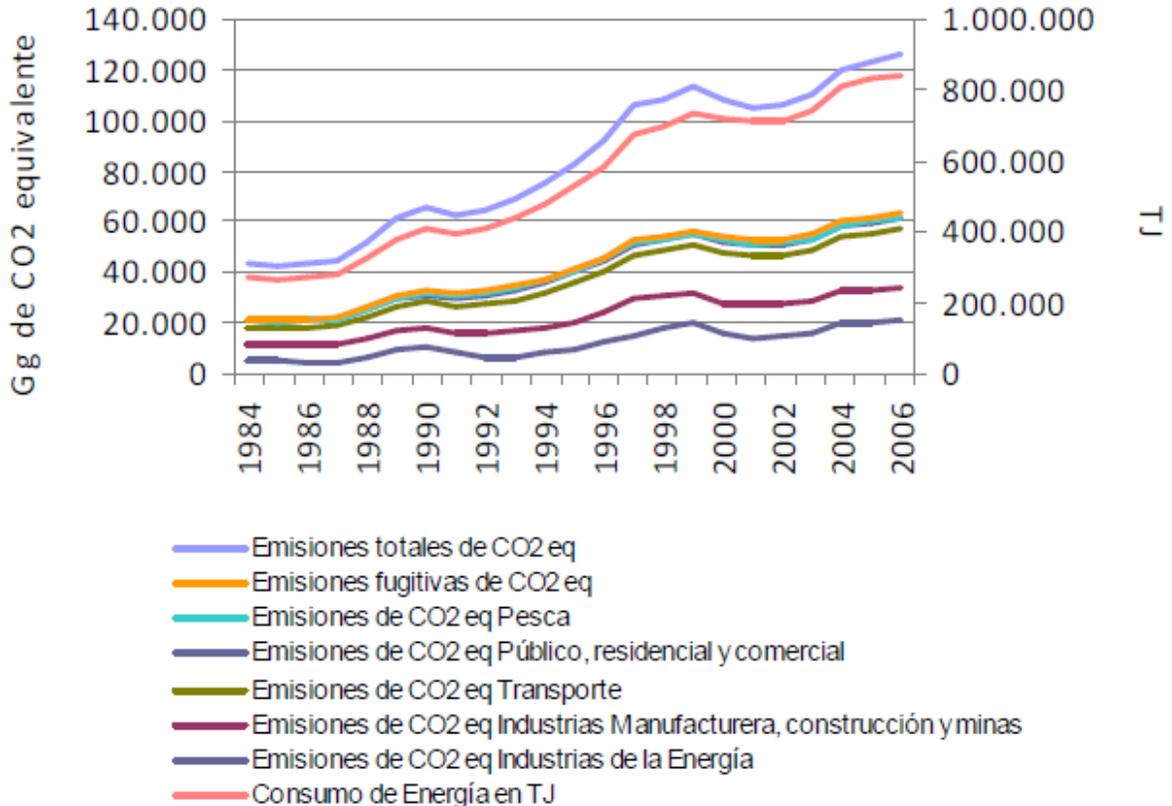
Debido a que la demanda de energía aumenta cada vez más a nivel mundial, genera un incremento en las emisiones de GEI, ello porque debido al crecimiento económico y demográfico se requiere más y más energía para la realización de las actividades cotidianas, en la figura 43 se puede ver la evolución de las emisiones de CO₂ contra el consumo de energía del año 1984 al 2006, haciéndose evidente una tendencia al aumento. Pero por el calentamiento global, como lo dice la ECF²⁰⁹, se presentan desafíos para el sector, el cual debe buscar la forma de reducir la cantidad de emisiones, ya sea por el cambio a uso de combustibles con menos carbono, mejorar la eficiencia energética, energías renovables, captura y almacenamiento de carbono y por último, la reducción de la demanda de energía.

²⁰⁷ REGISTRO DE EMISIONES Y TRANSFERENCIAS DE CONTAMINANTES (RETC). Fuente fija (estacionaria). [En línea]. [25 marzo de 2017] disponible en: <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-42137.html>

²⁰⁸ GRUPO CONSULTIVO DE EXPERTOS (GCE). Manual del sector de la energía. Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Sector de la Energía: quema de combustibles. [En línea]. [25 marzo de 2017] disponible en: https://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_natcom/training_material/methodological_documents/application/pdf/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf

²⁰⁹ EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION (ECF); World Energy Council (WEC); Universidad de Cambridge a través de la Judge Business School (CJBS) y Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL). Cambio Climático: Implicaciones para el Sector Energético. Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. En: El clima, un asunto de todos, 2014. 16p.

Figura 43. Evolución emisiones de CO₂ equivalente vs. Consumo de energía año 1984-2006



Fuente: POCH AMBIENTAL y DEUMAN. Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero. Santiago de Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente Conama, 2008. p.54.

El sector energético es el mayor participante en las emisiones globales de GEI; por ejemplo, la ECF²¹⁰ declaró en el año 2010, el 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero provenían de la producción de energía y actualmente cerca del 80% de la electricidad global proviene de plantas de energía térmica que en su mayoría utilizan carbón; asimismo, según Pulido²¹¹, además de las centrales térmicas, los hornos, estufas, calderas y motores, el venteo de gas también contribuye al calentamiento global por sus emisiones de CO₂.

6.2.1 Generación de electricidad por termoeléctricas de carbón. La energía eléctrica es un bien para mantener las sociedades y niveles de vida actuales, de

²¹⁰ EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION (ECF); World Energy Council (WEC); Universidad de Cambridge a través de la Judge Business School (CJBS) y Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL). Op. Cit., p. 4-5.

²¹¹ PULIDO, Ana y SIERRA, Magda. Módulo de energía. En: Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero 2000-2004. ed. Bogotá: IDEAM, 2009. p. 67-116. ISBN: 978-958-96863-7-9.

hecho, según Riaza²¹² en su tesis doctoral, se encuentra que el nivel de desarrollo de un país está ligado a su capacidad de generar energía; es por ello que su producción es de suma importancia, además, de acuerdo a la compañía Toshiba²¹³, se requiere que las plantas de energía sean eficientes, económicas, de fácil operación y gran capacidad. Un gran desafío que enfrentan los gobiernos y la industria, según dice Miller²¹⁴, es el de proveer un equilibrio entre la parte política-económica y energética, junto con la salud pública y el daño ambiental procedente de las fuentes de suministro de energía.

Teniendo en cuenta que las emisiones de GEI, en especial el CO₂, son de gran relevancia; la parte ambiental es el foco del presente trabajo, en la figura 44 se puede ver el porcentaje en cuanto a emisiones de dióxido de carbono en sectores industriales, siendo el de generación de electricidad el de mayor participación. Además, como dato del Instituto de Recursos Mundiales que a su vez fue referenciado por Miller²¹⁵, se encuentra que las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles en Canadá, Estados Unidos y México son responsables de 39%, 39% y 30% respectivamente, de las emisiones nacionales de CO₂. Las emisiones de dióxido de carbono en una central eléctrica que usa combustibles fósiles dependen de la cantidad de carbono que contiene el combustible y de la eficiencia de la central para convertir este en electricidad²¹⁶. Conjuntamente según, la IEA²¹⁷, el mayor impacto del sector eléctrico en la producción de las emisiones de CO₂ se debe a la cada vez creciente demanda final de energía junto

²¹² RIAZA, Juan. Captura de CO₂ en centrales termoeléctricas mediante co-combustión de carbón y biomasa en condiciones de oxicomustión. Oviedo, 2014, 216p. Tesis doctoral (Doctorado Ingeniería Energética). Universidad de Oviedo, Instituto Nacional del Carbón (INCAR)-CSIC.

²¹³ TOSHIBA. Thermal power generation - Introduction. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/engineering/pleng.htm>

²¹⁴ MILLER, Paul y ATTEN, Chris Van. Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en américa del norte. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). Montreal, 2004. 93p. ISBN: 2-923358-12-0.

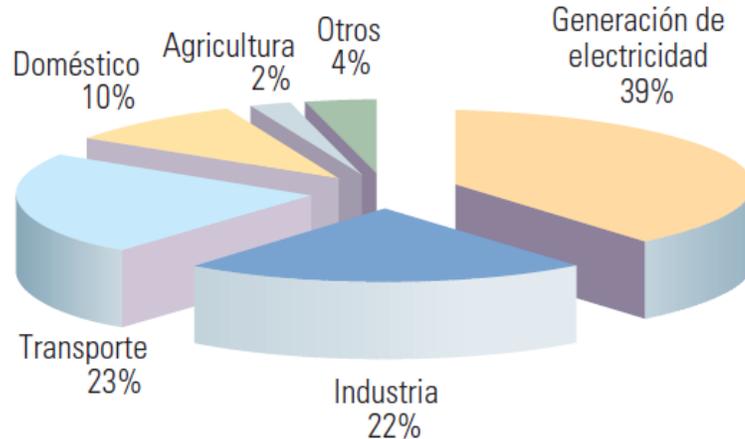
²¹⁵ INSTITUTO DE RECURSOS MUNDIALES. EarthTrends Country Profiles. Climate and Atmosphere—Canada. 2003. [En línea]: http://earthtrends.wri.org/pdf_library/country_profiles/Cli_cou_124.pdf citado por MILLER, Paul y ATTEN, Chris Van. Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en américa del norte. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). Montreal, 2004. 93p. ISBN: 2-923358-12-0.

²¹⁶ MILLER, Paul y ATTEN, Chris Van. Op. Cit., p. 20.

²¹⁷ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2004 Insights. IEA/OECD, París, Francia. 2004 citado por ESCOSA, Jesús. Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado: Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón, 2009; 256 p. ISBN 978-84-692-1629-3.

al mayor uso del carbón como materia prima así como a las pérdidas habidas en el proceso de conversión de energía.

Figura 44. Emisiones globales de CO₂ por sector industrial



Fuente: BENNACEUR, Kamel, *et al.* Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. *En: Oilfield Review*. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 51.

El proceso en una termoeléctrica consiste, según Mastrangelo²¹⁸, en la conversión de energía térmica en mecánica y desde ésta en energía eléctrica; la transformación de energía térmica en mecánica ocurre a través de un fluido que produce trabajo en su proceso de expansión en las turbinas y la modificación a eléctrica se efectúa por el accionamiento de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina. En otras palabras:

Las plantas a carbón producen electricidad a partir de la combustión de carbón, en un generador de vapor que transforma el agua en vapor de alta presión y alta temperatura. El vapor circula por una serie de turbinas de vapor que impulsan un generador eléctrico para producir electricidad. El vapor de escape de las turbinas se refrigera, por condensación se convierte en agua y finalmente se devuelve al generador de vapor para recomenzar el proceso²¹⁹.

Las centrales termoeléctricas, como dice Mastrangelo²²⁰, se clasifican según el método de combustión que utilicen, ya sea interna o externa y hay diferentes combustibles fósiles los cuales se usan, el más común y contaminante es el carbón, se mantiene en segunda posición en la matriz energética debido a su bajo costo. También hay dos ciclos diferentes, de ciclo convencional y ciclo combinado; el ciclo convencional obtienen la energía mecánica necesaria a partir del vapor

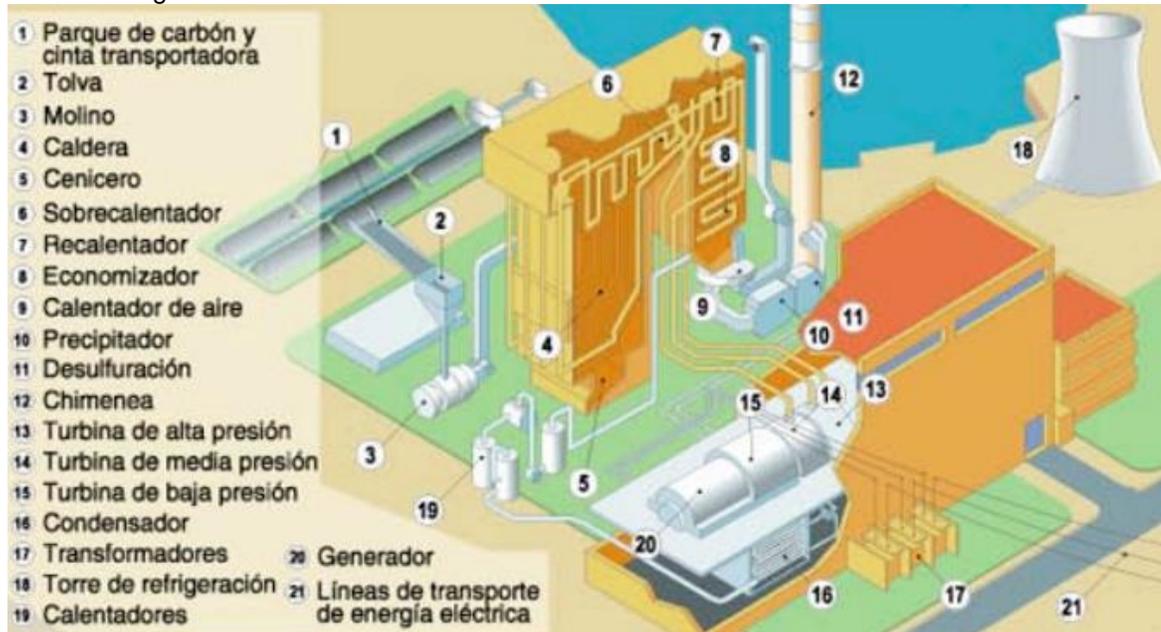
²¹⁸ MASTRÁNGELO, Sabino. Conceptos de generación termoeléctrica: Combustibles utilizados e impactos ambientales. *En: Boletín energético*. Vol. 11, 2008; p.14.

²¹⁹ TENARIS. Centrales Eléctricas a Carbón. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.tenaris.com/es-ES/Products/PowerGeneration/CoalFiredPowerPlants.aspx>

²²⁰ MASTRÁNGELO, Sabino. Op. Cit., p. 20.

generado por la caldera, además, los combustibles más utilizados para este tipo de ciclos son el carbón o el gas natural o petróleo y sus derivados; mientras que acorde a la Superintendencia del Medio Ambiente²²¹, en el ciclo combinado, la electricidad se genera mediante la utilización conjunta de una turbina a gas y una turbina a vapor, en la figura 45 se encuentra el diagrama de una central térmica convencional de carbón con sus partes y nombres.

Figura 45. Central térmica convencional de carbón.



Fuente: FERNÁNDEZ, Inmaculada y ROBLES, Arsenio. Centrales de Generación de Energía Eléctrica. Universidad de Cantabria. p.3

Debido a la gran cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera, la captura y almacenamiento de carbono (CAC) está siendo implementada en algunas plantas como proyecto piloto en países industrializados; un ejemplo es la compañía TOSHIBA, la cual es una multinacional japonesa, cuyos productos y servicios son de tecnología, comunicaciones, componentes y materiales electrónicos, entre otros.

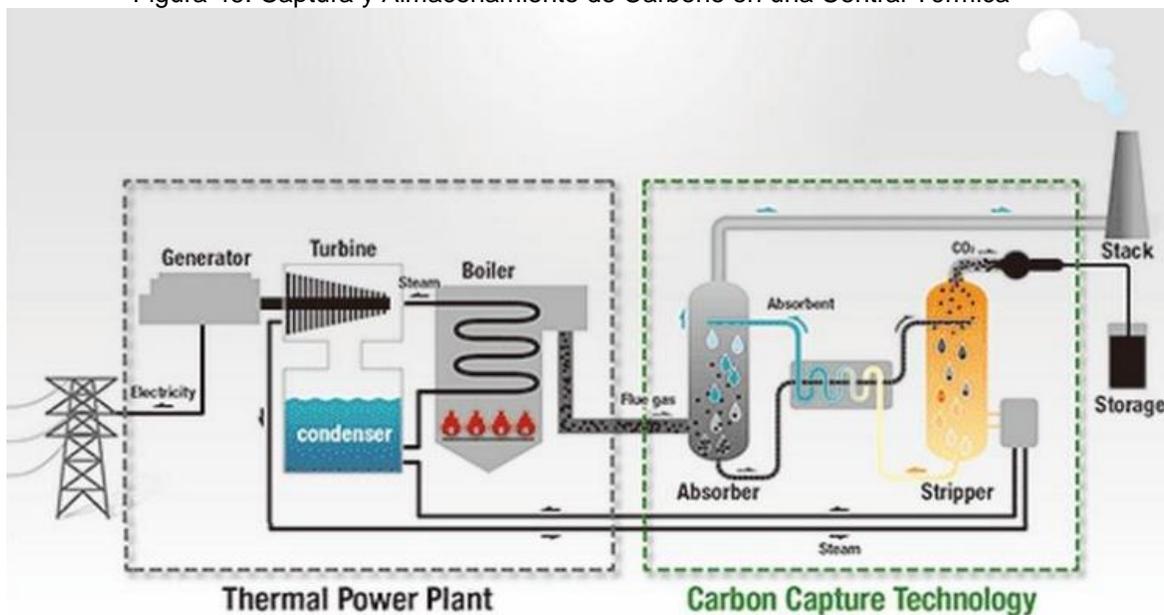
Ésta emplea la captura post-combustión; en la figura 46 se encuentra el diagrama de una central térmica con la CAC y en la figura 47 está el esquema de la planta piloto de TOSHIBA²²² la cual se construyó en el 2009, se llama Ariake Mikawa de Sigma, en Japón, captura 10 toneladas de CO₂ al día; luego, en el 2011 se realizó un estudio de viabilidad para una central térmica de carbón Ready Ultra Super

²²¹ SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA). Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Chile-Miraflores, 2014. 25p.

²²² TOSHIBA. Carbon Capture Technology. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/ccs/ccs.htm>

Critical de CCS en Bulgaria. Otro ejemplo, según Talbot²²³, es la termoeléctrica de carbón de Saskatchewan en Canadá, la cual desde el año 2014, captura el 90% del dióxido de carbono de las chimeneas y lo inyecta para producir petróleo, de acuerdo a Araus²²⁴, específicamente le vende alrededor de 1 millón de toneladas a la petrolera canadiense Cenovus Energy de Calgary, para que esta pueda extraer los restos de petróleo de sus yacimientos con el CO₂.

Figura 46. Captura y Almacenamiento de Carbono en una Central Térmica

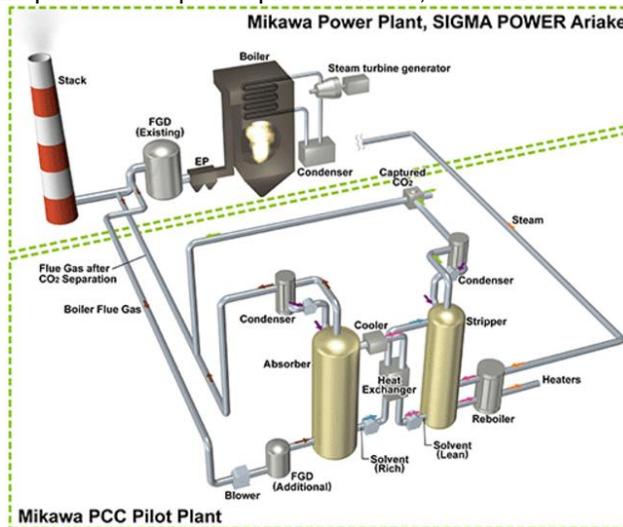


Fuente: TOSHIBA. Carbon Capture Technology. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/ccs/ccs.htm>

²²³ TALBOT, David. Canadá pone en marcha su primera central termoeléctrica de carbón que captura el CO₂. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.dyna-energia.com/noticias-ES/canada-pone-en-marcha-su-primera-central-termoelectrica-de-carbon-que-captura-co2>

²²⁴ ARAUS, Magdalena. Esta termoeléctrica captura su propio CO₂ para no contaminar (bueno, casi). [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/2528/Esta_termoelectrica_captura_su_propio_CO2_para_no_contaminar_bueno_casi/

Figura 47. Esquema de la planta piloto Mikawa, TOSHIBA



Fuente: TOSHIBA. Carbon Capture Technology. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/ccs/ccs.htm>

Siguiendo con el tema de la tecnología de captura y almacenamiento de carbono, tema, respecto a las centrales termoeléctricas, el autor Escosa recalca lo siguiente:

En cuanto a la captura y almacenamiento de CO₂, de las diferentes tecnologías consideradas (post, pre y oxidación) es la de postcombustión la que ofrece una mejor alternativa para las instalaciones ya existentes. Es la única que puede ser instalada sin realizar excesivas modificaciones de la central termoeléctrica, puesto que se basa en aislar el CO₂ directamente de la corriente de gases generados. El resto de tecnologías requieren de más modificaciones: la pre-combustión necesita una modificación del sistema relacionado con la preparación del combustible antes de su combustión, y la combustión oxi-fuel requiere una nueva concepción del sistema de combustión para permitir la combustión con un comburente formado principalmente por oxígeno²²⁵.

Lo anterior puede ser aplicado a más industrias las cuales sean grandes contribuyentes de GEI por quema de combustibles y que no todas las locaciones quieran hacer grandes cambios pero si quieren ayudar a mitigar el calentamiento global, como lo es la industria petrolera.

6.2.2 Venteo y quema de gas en la producción de petróleo. Es un proceso que emite gran cantidad de gases, incluyendo al CO₂ el cual es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático, el proceso es el de venteo y quema de gas. Lo previo se realiza por el gas asociado, el cual es el que se encuentra en forma disuelta directamente en el crudo, asimismo se encuentra

²²⁵ ESCOSA, Jesús. Op. Cit., p. 30.

como gas libre, se compone principalmente de metano y otros hidrocarburos, incluido el dióxido de carbono; con este gas asociado según informa Pieprzyk²²⁶, hay diferentes opciones a tomar, se utiliza para generación de energía, licuarse para dar gas licuado del petróleo (GLP) o se reinyecta en el pozo petrolero, también se quema o ventea.

De acuerdo con Pieprzyk²²⁷; mundialmente, del gas asociado, dos tercios es utilizado, pero el tercio restante es quemado o venteado, ya sean por las razones previamente nombradas o por bajos costos del gas, altos costos de inversión, precio de los certificados de CO₂ bajos o fluctuantes, componentes tóxicos del gas, falta de mercados de consumo cercanos, inestabilidad política por disturbios sociales, altos costos de licuefacción del gas, entre otras. Como se nombra anteriormente y según De Souza²²⁸, el venteo de gas se puede dar por la inexistencia de instalaciones de gasoductos o por ser pozos aislados o por ser gas con contenido de sustancias inertes y nocivas al consumo como lo son el CO₂ y el SH₂, o por aprovechar al máximo el petróleo; pero gobiernos, empresas petroleras e instituciones de desarrollo, reconocen que la quema del gas no es sostenible desde la perspectiva ambiental y de la de gestión de los recursos.

Según la EIA²²⁹, el consumo energético mundial aumentará entre el 2010 y 2040 un 56%, siendo los combustibles fósiles los de mayor participación como se muestra en la figura 48. Aunque la industria ha evolucionado, es decir, en los años 1950 se enfocaba en tecnologías para encontrar y producir petróleo en zonas con grandes manifestaciones del hidrocarburo superficialmente; en los 1980 surgió la sísmica 3D, con la cual se puede explorar en zonas de geología más compleja; hoy en día los retos consisten en aprovechar los recursos no convencionales para aumentar el recobro de los campos existentes, en utilizar tecnología inalámbrica, entre otras, teniendo en cuenta la seguridad de procesos, la calidad de los combustibles y la gestión ambiental; la última es de gran importancia, debido a que como enuncia Saavedra²³⁰, la humanidad actual, utiliza el equivalente de 1.5

²²⁶ PIEPRZYK, Björn y ROJAS, Paula. Quema y venteo de gas asociado: Desarrollo actual y efectos del petróleo marginal. ERA - Energy Research Architecture, 2015. 25p.

²²⁷ *Ibid.*, p. 7.

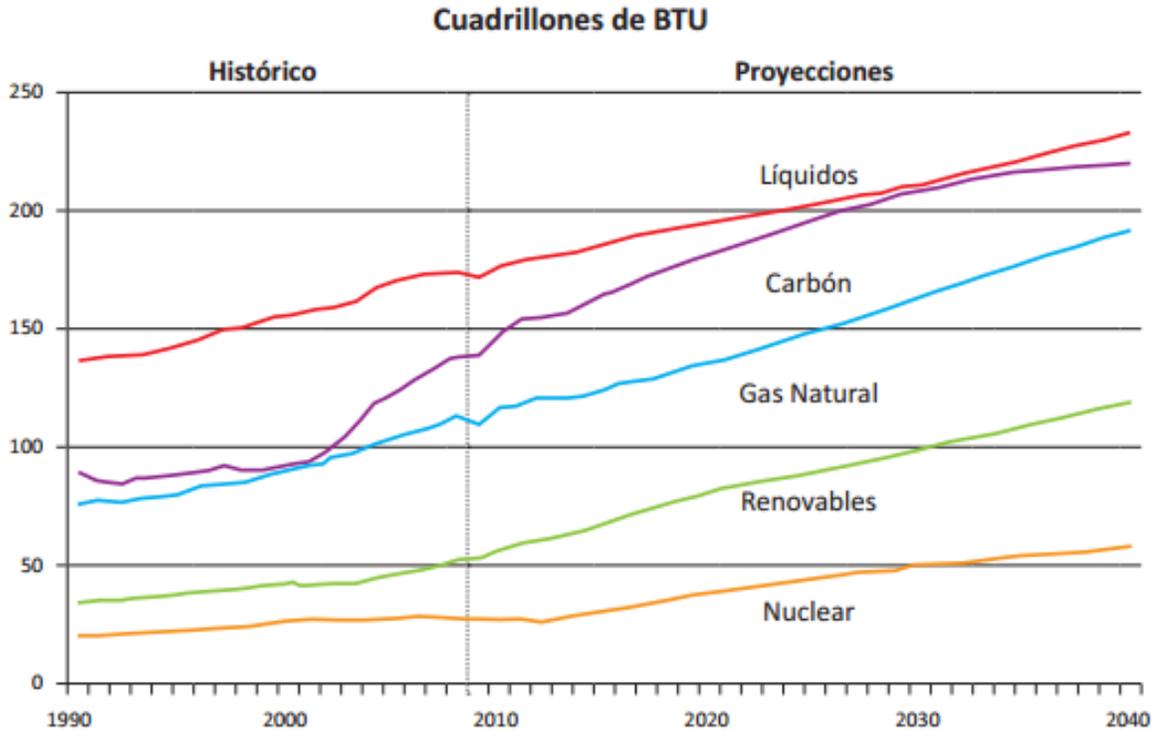
²²⁸ DE SOUZA, Peter. Iniciativa busca poner fin a la quema de gas natural hasta el 2030. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://reportheenergia.com/v2/iniciativa-busca-poner-fin-a-la-quema-de-gas-natural-hasta-el-2030/>

²²⁹ U.S. Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook 2013: with projections to 2040. Washington, 2013; 312p.

²³⁰ SAAVEDRA, Néstor y JIMÉNEZ, Favio. Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. En: Revista de Ingeniería, No. 40. (Mayo, 2014); p. 50-56.

planetas para proporcionar los recursos naturales que utiliza y asimismo, absorber sus desechos.

Figura 48. Consumo de energía mundial por tipo de combustible, 190-2040



Fuente: World energy consumption by fuel type, 1990-2040: Histórico: EIA, International Energy Statistics database (as of November 2012), www.eia.gov/ies. Proyecciones: EIA, World Energy Projection System Plus (2013) citado por U.S. Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook 2013: with projections to 2040. Washington, 2013. p. 11.

Por lo anterior es importante reducir las emisiones de CO₂ provenientes del sector energético, se dice que se pueden reducir un 70% para el 2050 y podrían desaparecer para el 2060 con una perspectiva positiva para la parte económica. Según un informe de la Agencia Internacional de la Energía Renovable (IRENA), se basó Roca²³¹ para mencionar que se requiere una inversión de 29 billones de dólares hasta el 2050, lo que representa el 0.4% del PIB mundial, para descarbonizar el sector con ayuda de energías renovables y mejora de la eficiencia energética, teniendo en cuenta que la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) contribuye a la segunda, que es la eficiencia energética y trae

²³¹ ROCA, José. Esto tendría que hacer el planeta si quiere acabar con las emisiones procedentes del sector energético. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/esto-tendria-que-hacer-el-planeta-si-quiere-acabar-con-las-emisiones-procedentes-del-sector-energetico/>

consigo más beneficios. En cuanto a Colombia, según Saavedra²³², la CAC es una propuesta como alternativa de mitigación de grandes volúmenes de CO₂.

Por lo demás, cada vez hay más y más países que están empezando a instalar las plantas de captura de CO₂, con el fin de generar electricidad. Anualmente se liberan sin control aproximadamente 150.000 millones de metros cúbicos de gas natural, lo que se traduce a 400 millones de toneladas de CO₂ emanados al ambiente. Razón por la Petrolnews²³³ publicó que el Banco Mundial creó la Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas (GGFR), la cual es una entidad público-privada de gobiernos que ayuda a reducir la quema y ventilación del hidrocarburo, mundialmente; la entidad incorpora compañías de tecnología que sean capaces de capturar los gases asociados de yacimientos para producir energía eléctrica.

Gracias a la acción de la GGFR, según el Grupo Banco Mundial²³⁴; países como Rusia y Kazajstán han reducido las quemas de gas y las emisiones provenientes de la actividad de producción de petróleo; la asociación ayuda a los países en desarrollo para reducir la quema mediante la comercialización del gas asociado, reglamentos sobre quema, venteo y uso del gas, formación de capacidades para obtener el financiamiento de los créditos o bonos de carbono.

Debido a que los sectores industriales que son los principales contribuyentes de gases de efecto invernaderos están interesados ya sea por responsabilidad ambiental o por la parte legal, en reducir las emisiones de CO₂ para ayudar a mitigar el calentamiento global, incrementar la eficiencia energética y ser más sostenibles, surge una tecnología que se ha desarrollado, probado y funciona para el fin; ello se logra mediante la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC).

²³² SAAVEDRA, Néstor y JIMÉNEZ, Favio. Op. Cit., p. 54.

²³³ PETROLNEWS. Captura de gases de venteo. En: Revista Nuevas Energías. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://www.petrolnews.net/noticia.php?ID=3a25ea&r=15221>

²³⁴ GRUPO BANCO MUNDIAL. Rusia y Kazajstán, líderes en reducción de la quema de gas y bajas emisiones. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2011/06/27/russia-kazakhstan-lead-way-to-reduce-gas-flaring-and-lower-emissions>

7. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO

La captura o captación y almacenamiento de carbono (CAC), es una tecnología de baja emisión de carbono la cual implica capturar el CO₂ resultante de la combustión de combustibles fósiles, ya sea en la generación de energía o en la preparación de combustibles o en otros procesos industriales; el capturar según Metz²³⁵, envuelve el separar el gas de interés de los demás, para luego ser transportado por medio de tuberías o barcos a su lugar de almacenamiento, donde quedará aislado de la atmósfera por un periodo largo de tiempo. La IEA, menciona que de acuerdo a sus estimativos, el carbono capturado en procesos industriales entre el año 2015 y 2050, podría ser de hasta 45%, para ello, la Unidad de Planificación Minero Energética²³⁶ (UPME), espera que se materialicen 30 grandes proyectos hasta el 2020.

Esta tecnología es capaz de reducir significativamente las emisiones de CO₂, hace importante su adopción extendida para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C. Además de ello, como dice la ECF²³⁷, tiene una capacidad de almacenamiento geológico grande y suficiente para cumplir con la demanda del siglo XXI. Su principal aplicación, como lo afirma Metz²³⁸, es para grandes fuentes de gases, como las centrales eléctricas de combustibles fósiles, plantas de procesamiento de los combustibles, otras plantas industriales como las de fabricación de hierro, acero, cemento y otros; para fuentes pequeñas y móviles como el sector de transporte o comercial, sería difícil y costosa. Las plantas de CAC, indica la Carbon Capture & Storage Association²³⁹, se encuentran usualmente, junto de la que se va a capturar el carbono, cuando se utilizan tuberías para el transporte, se utilizan unas similares a las ya utilizadas para el transporte de gas natural, lo que garantiza altos estándares de diseño, protección de la misma y del medio ambiente. Con este capítulo se pretende describir el funcionamiento de la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC), la cual consta de tres etapas; captura, transporte y almacenamiento.

²³⁵ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 54.

²³⁶ UNIDAD DE PLANIFICACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050. Bogotá, 2015. 184p.

²³⁷ EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION (ECF); World Energy Council (WEC); Universidad de Cambridge a través de la Judge Business School (CJBS) y Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL). Op. Cit., p. 12-13.

²³⁸ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 108.

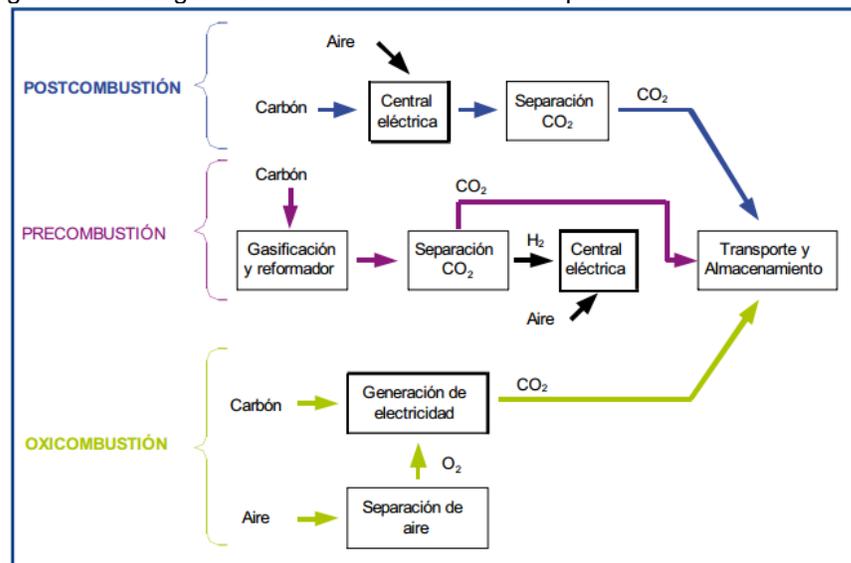
²³⁹ CARBON CAPTURE & STORAGE ASSOCIATION. Frequently asked questions, what is a CCS plant? What will it look like?. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <http://www.ccsassociation.org/faqs/ccs-general/>

7.1 CAPTURA DE CO₂

El capturar el dióxido de carbono, implica separarlo de una corriente de gas, se obtiene una corriente de CO₂ concentrada, se requiere que sea de la mayor pureza posible y a alta presión para su posterior inyección en su lugar de almacenamiento. La principal aplicación es para grandes fuentes fijas como las plantas de energía de fósiles, plantas de procesamiento de combustibles y otras industriales, particularmente la fabricación de hierro, acero, cemento y productos químicos; la captura a pequeña escala es más difícil y costosa; además de ello, en palabras de Metz²⁴⁰, la captura del aire ambiente no se ha investigado a fondo debido a que la concentración es de alrededor 380ppm, valor que es inferior al de un gas de combustión.

7.1.1 Sistemas de captura de CO₂. Los sistemas de captura suelen clasificarse en 3, pre-combustión, oxi-combustión parcial y total; y post-combustión como se muestra en la figura 49, se resume en la tabla 3 y se explica a continuación; las tecnologías nombradas, según la ZEP²⁴¹, pueden capturar al menos el 90% del CO₂ emitido, su única limitación para alcanzar el 100% son los actuales costos elevados.

Figura 49. Configuraciones de los sistemas de captura



Fuente: MARTÍNEZ José María, *et al.* Tecnologías de captura de CO₂. En: El futuro del carbón en la política energética española. Fundación para Estudios sobre la Energía. Madrid: TIASA, 2008. p. 181.

²⁴⁰ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 108.

²⁴¹ ZERO EMISSIONS PLATFORM (ZEP). CO₂ Capture-understanding the three technologies. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <http://www.zeroemissionsplatform.eu/ccs-technology/capture.html>

7.1.1.1 Post-combustión. Se trata de cómo lo dice Metz²⁴², en técnicas para después de la combustión, en lugar de descargar los gases directamente a la atmósfera, el gas de combustión pasa a través de equipos para separar la mayor parte de dióxido de carbono. Su objetivo es separar el CO₂ que se encuentra diluido en los gases efluentes por técnicas como membranas, absorción química, adsorción física, ciclos de calcinación-carbonatación, entre otros. Es la técnica más avanzada y la que está siendo aplicada en ciertos mercados debido a que es la que requiere menos modificación de las plantas productivas actuales. Es decir, según Riaza²⁴³, su ventaja es que puede ser aplicable a cualquier corriente de humo de cualquier planta sin incurrir a alguna modificación de sus componentes, por lo tanto, es la opción de menor riesgo empresarial. La absorción química, según Morales²⁴⁴, es la técnica principal a nivel comercial para capturar el CO₂ mediante aminas; este ofrece alta eficiencia de captura y selectividad, menor consumo de energía y los costos a comparación de otros procesos son mejores; según Metz²⁴⁵, también hay otros procesos, se encuentran otras formas como la adsorción, por membranas, por sorbentes sólidos.

Normalmente, en la absorción química se utiliza un solvente líquido para captar la fracción de dióxido de carbono presente en el gas de combustión, cuyo componente principal es el nitrógeno. En la figura 50 se muestra el diagrama de flujo para la absorción, donde después de enfriar los gases de combustión, se ponen en contacto con el disolvente en el absorbedor que maneja temperaturas de 40-60°C; para superar la caída de presión se necesita un ventilador. El gas de combustión se somete a una sección de lavado con agua para equilibrar el agua en el sistema y para eliminar cualquier parte de disolvente o vapor que haya sido transportado. El disolvente “rico” el cual es el que contiene el CO₂, se bombea a la parte superior de un separador o recipiente de regeneración a través de un intercambiador de calor.

La regeneración del disolvente se realiza en el separador a temperaturas de 100-140°C y presiones similares a la atmosférica, después, el vapor se recupera en el condensador y se devuelve al separador mientras que el CO₂ sale del separador. El disolvente “pobre” que contiene menor concentración del gas de interés, es bombeado de nuevo al absorbedor a través del intercambiador de calor rico en grasa y un enfriador para llevarlo a la temperatura del absorbedor.

²⁴² METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 109.

²⁴³ RIAZA, Juan. Op. Cit., p. 21.

²⁴⁴ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 9, 15.

²⁴⁵ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 114-121.

En la figura 50, también aparecen otros equipos adicionales que son necesarios para mantener la calidad de la solución, como lo afirma Metz²⁴⁶, es mediante la utilización de filtros, recuperador de funcionamiento térmico, entre otros. Para una central eléctrica moderna de carbón pulverizado o de ciclo combinado de gas natural, se utilizaría un solvente como la monoetanolamina.

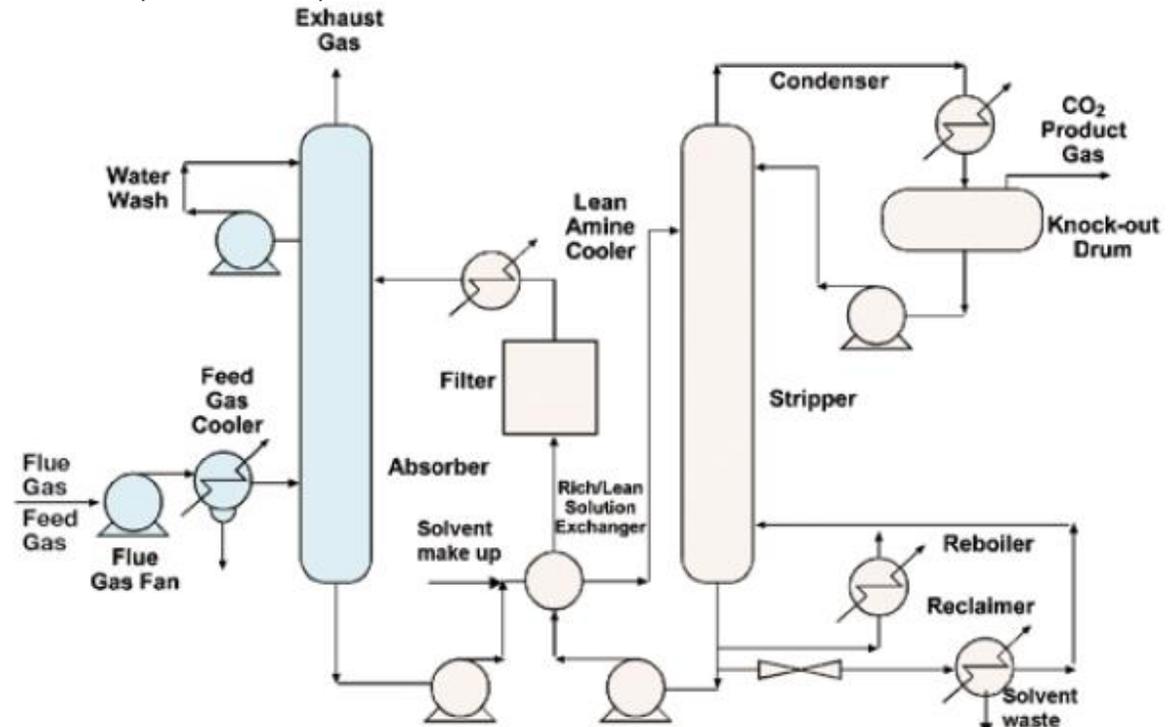
Metz²⁴⁷ afirma que hay parámetros clave que determinan el funcionamiento técnico y económico de un sistema de absorción de dióxido de carbono, son los siguientes:

- Caudal de los gases de combustión: determinará el tamaño del absorbedor y este representa una contribución considerable al coste total.
- Contenido de CO₂ en los gases de combustión.
- Eliminación de CO₂: las recuperaciones típicas se encuentran entre el 80% y el 95%, entre más alta sea la columna de absorción, mayor energía y por ende, mayores costos.
- Caudal de disolvente: determinará el tamaño de la mayoría de los equipos y también las concentraciones de CO₂ elegidas dentro de las soluciones pobres y ricas.
- Requerimiento de energía: El consumo de energía del proceso es la suma de la energía térmica necesaria para regenerar los disolventes y la energía eléctrica requerida para operar bombas de líquido y el ventilador. También se requiere energía para comprimir el CO₂ recuperado hasta la presión final requerida para el transporte y almacenamiento.

²⁴⁶ *Ibíd.*, p. 115.

²⁴⁷ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 115.

Figura 50. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de CO₂ de los gases de combustión por absorción química



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p.115. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

7.1.1.2 Pre-combustión. Este sistema de captura según manifiesta Martínez²⁴⁸, se realiza antes de la combustión, se necesita que el combustible primario se transforme a una corriente de gases, cuyos componentes son CO₂ y H₂; pasa a no tener o tener un bajo contenido de carbono; por lo que se obtiene hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂), donde el primero queda disponible para su combustión en turbinas de gas y el segundo, para su posterior almacenamiento como lo enuncia Muñoz²⁴⁹. Éste tipo de captura, permite maximizar la potencia de salida en centrales eléctricas.

El combustible primario es procesado en un reactor con vapor y aire u oxígeno para producir una mezcla, luego mediante la reacción del monóxido de carbono con el vapor en un segundo reactor se produce hidrógeno adicional y dióxido de

²⁴⁸ MARTÍNEZ, José María, *et al.* Tecnologías de captura de CO₂. En: El futuro del carbón en la política energética española. Fundación para Estudios sobre la Energía. Madrid: TIASA, 2008. p. 186.

²⁴⁹ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 9.

carbono; con ello, como lo afirma Metz²⁵⁰, la separación de H₂ y CO₂ es más fácil de realizar. Para este sistema de captura se prevén dos aplicaciones, la primera, es producir un combustible esencialmente libre de carbono (hidrógeno) y segundo, con la captura previa a la combustión, se puede utilizar para reducir el contenido de carbono de los combustibles y queda disponible su para almacenamiento.

Hay tres pasos principales para el aprovechamiento de combustibles primarios en este sistema de captura como manifiesta Martínez²⁵¹:

1. Reacción de producción de gas de síntesis: da como resultado una corriente compuesta por hidrógeno y monóxido de carbono proveniente del combustible primario, existen dos vías para ello.
 - a. Reformado con vapor de agua
 - b. Reacción con oxígeno
2. Reacción shift para convertir el CO del gas de síntesis a CO₂: aporta más hidrógeno a la corriente de gases del paso anterior.
3. Separación del CO₂: existen diferentes procedimientos para separar el dióxido de carbono de la corriente CO₂/H₂; ya separado, está disponible para su almacenamiento.

Actualmente, como lo hace saber Martínez²⁵², existen tecnologías para la captura pre-combustión, las principales se enlistan a continuación:

- Reformado con vapor de gas e hidrocarburos ligeros
- Oxidación parcial de gas e hidrocarburos ligeros
- Reformado auto-térmico de gas y luz
- Gasificación de carbón, residuos de petróleo o biomasa
- Ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC) para la generación de energía
- Hidrógeno del carbón con captura de CO₂
- Combustibles fluidos a base de carbono y multi-productos
- Procesos de disolventes químicos y físicos

7.1.1.3 Oxi-combustión parcial y total. Aquí la combustión se realiza en presencia de oxígeno puro, es decir, en ausencia de nitrógeno o con una mezcla enriquecida de O₂ en lugar de aire para evitar la dilución del CO₂ en la corriente de

²⁵⁰ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 130.

²⁵¹ MARTÍNEZ José María, *et al.* Op. Cit., p. 186.

²⁵² *Ibíd.*, p. 130-136.

humos. El resultado es un gas con alto contenido en CO₂, generalmente, de más del 80% en volumen, por lo que se necesitan técnicas para separar los gases efluentes y esas técnicas dependerán de la concentración de CO₂ en los mismos. La diferencia entre la oxi-combustión total y parcial, como lo proclama Muñoz²⁵³, reside en la composición del comburente o agente oxidante, mientras que en la total el gas es oxígeno puro, en la parcial es una mezcla con alta concentración en O₂ pero también contiene cierta cantidad de nitrógeno.

En este proceso, como lo explica Metz²⁵⁴, se elimina el nitrógeno del gas de combustión mediante la combustión de un hidrocarburo o un combustible carbonoso el cual incluye biomasa, en una mezcla de oxígeno puro y un gas de combustión reciclado rico en CO₂. La combustión con oxígeno puro se realiza a una temperatura de 3500°C, lo que es un valor alto para las plantas de energía; por ello, se controla la temperatura a entre 1300-1400°C en un ciclo de turbina de gas y 1900°C en una caldera alimentada con combustible y oxígeno. Los productos de la combustión contienen principalmente vapor de agua, dióxido de carbono y el exceso de oxígeno requerido para asegurar la combustión completa del combustible. Después de enfriar el vapor de agua para condensarlo, este contiene aproximadamente 80-98% de CO₂ dependiendo del combustible utilizado; esa corriente concentrada de dióxido de carbono puede comprimirse, secarse y purificarse antes de su suministro a la tubería para el almacenamiento.

Los principales sistemas de oxi-combustión son clasificados según el modo en el que se suministra el calor de combustión y si el gas se utiliza como fluido de trabajo, Metz²⁵⁵ los clasifica como se presenta a continuación:

- a. Calefacción indirecta de oxígeno - ciclo del vapor: la cámara de combustión proporciona calor a un fluido separado mediante la transferencia de calor a través de una superficie. Puede utilizarse con cualquier hidrocarburo o combustible que contenga carbono.
- b. Calefacción directa de oxígeno - ciclo de la turbina de gas: tiene lugar en una corriente de recirculación rica en CO₂, presurizada en una turbina de gas modificada.
- c. Calentamiento directo de oxígeno - ciclo de la turbina de vapor: el agua se presuriza como un líquido y luego se evapora, se calienta mediante la inyección directa y la combustión de un combustible con oxígeno puro y se expande en una turbina.

²⁵³ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 9-13.

²⁵⁴ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 122.

²⁵⁵ *Ibíd.*, p. 126.

Tabla 3. Esquema de los procesos para las diferentes técnicas de captura de carbono

| Pre-Combustión | Oxi-combustión | | | Post-Combustión | | |
|--|---|----------------|-----------------------|---|----------------|-----------------------|
| Separación de oxígeno | Separación de oxígeno | | | | | |
| Manejo del combustible (lignito/biomasa) | Preparación del combustible. Secado del lignito | | | Preparación del combustible. Secado del lignito | | |
| Gasificación y reformado (Gas natural, carbón lignito y biomasa) | Oxi-combustión parcial o total | | | Combustión (Lecho fluidizado, carbón pulverizado, lignito, coque de petróleo) | | |
| Eliminación del polvo | Caldera | Turbina de gas | Combustión industrial | Caldera | Turbina de gas | Combustión industrial |
| Intercambio de CO | Ciclo de gases | | | Ciclo de gases | | |

Fuente: European technology platform for Zero Emission fossil fuel Power plants (ZEP). Long-Term R&D Plan: CAPTURE citado por MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento. Agrupación de fabricantes de cemento de España, 2011. p. 9-10. ISBN 978-84-615-5702-8.

7.1.2 Tecnologías para la captura de CO₂. Como se nombró anteriormente, existen varios métodos para separar el CO₂, los principales son por separación con disolventes, membranas de separación y separación criogénica. También se encuentran otros como la absorción, adsorción y ciclos de carbonatación-calcinación, la absorción, es decir, la separación se explicó anteriormente y este junto con otras tecnologías de captura se exponen brevemente a continuación.

7.1.2.1 Separación con disolventes. Según Metz²⁵⁶, se consigue haciendo pasar el gas que contiene el dióxido de carbono en contacto íntimo con un absorbente o disolvente líquido capaz de capturarlo. Como se muestra en la figura 51a, el solvente cargado con CO₂ se transporta a un recipiente, donde libera el CO₂ luego de una disminución de presión o después de cualquier otro cambio en las condiciones del mismo. El solvente resultante pasa a regeneración y es devuelto para capturar de nuevo el gas de interés, volviendo a este un proceso cíclico. Un problema de este sistema es que el flujo de disolvente tiene que ser grande para que coincida con el gran flujo de CO₂ que se procesa en la planta, por lo cual, tanto equipos como la cantidad de energía es inmensa. Usualmente los gases pasan a través de una solución de aminas, la cual como indica Muñoz²⁵⁷, absorbe el CO₂ de manera selectiva, comúnmente se utiliza la monoetanolamina (MEA).

²⁵⁶ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 109.

²⁵⁷ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 15.

7.1.2.2 Membranas de separación. Como lo comunica Metz²⁵⁸, son materiales especialmente diseñados y fabricados para que permitan la penetración selectiva de un gas a través de ellas, como se muestra en la figura 51b. El proceso se basa en una interacción física o química de los gases con el material de la membrana, provocando que un gas pase más rápido que otro. No cuentan con una gran capacidad de separación por lo que se requiere de varias etapas o recirculación de los humos para una adecuada separación, lo que incrementa la complejidad del sistema, consumo energético y por ende los costos; la productividad de la membrana es determinada por la presión parcial a través de la membrana, por el espesor y superficie de la misma. Según Muñoz²⁵⁹, tiene ventajas, las cuales son su versatilidad, bajo coste de instalación, no es necesario gestionar ningún tipo de residuo, permite variaciones en la composición y volumen del flujo del gas.

7.1.2.3 Separación criogénica. Como lo afirma Muñoz²⁶⁰; consiste en la licuación de los gases para su posterior destilado, es decir, debido a que los gases tienen diferentes puntos de ebullición, se pueden separar al enfriarlos cuando se logran dos estados diferentes; ésta técnica tiene dos inconvenientes, primero, es la excesiva presión que se necesita (+5.1atm) y segundo, las reducidas temperaturas a las que hay que disminuir (-56.6°C), lo que consume gran cantidad de energía. En palabras de Metz²⁶¹, un gas puede convertirse a líquido por una serie de pasos de compresión, enfriamiento y expansión; una vez se encuentre en forma líquida, los componentes del gas se pueden separar por la columna de destilación como se muestra en la figura 51c.

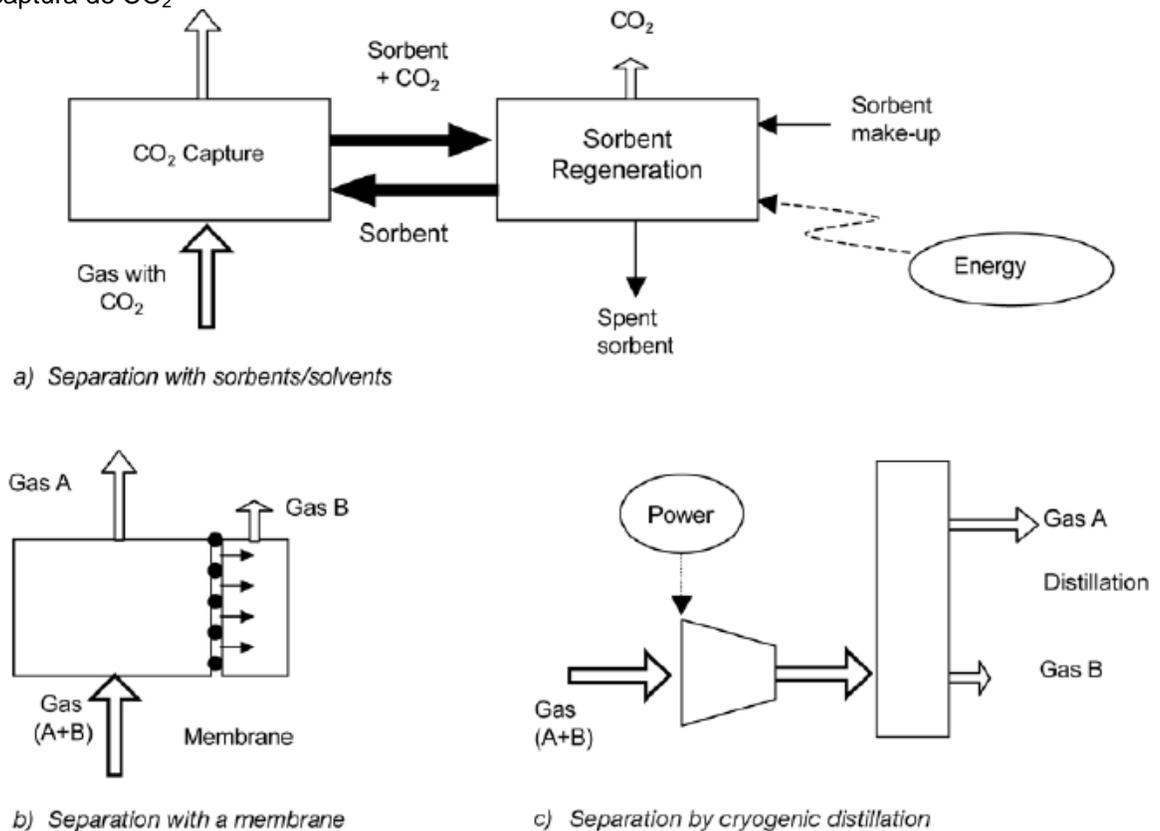
²⁵⁸ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 109.

²⁵⁹ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 16.

²⁶⁰ *Ibíd.*, p. 16.

²⁶¹ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 110.

Figura 51. Esquemas generales de los principales procesos de separación relevantes para la captura de CO₂



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p.25. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

Aparte de los medios de captura de CO₂ anteriormente nombrados, de acuerdo a Muñoz²⁶², existen otros como los ciclos de carbonatación-calcinación, los cuales consisten en el aprovechamiento de la reacción de carbonatación del CaO para recuperar el absorbente en un calcinador. Para formar los carbonatos se requieren altas temperaturas (600°C), la calcinación también lo requiere (1000°C). Puede emplearse tanto en pre como en post-combustión. También está la adsorción, que es un proceso que atrapa o retiene en la superficie de un material átomos, iones o moléculas; dando como resultado una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido; y la absorción, que pone en contacto líquidos y gases y en función de la solubilidad de los componentes de los gases de alimentación, los gases pueden ser absorbidos de manera selectiva por el disolvente líquido, mientras que el resto de gases atraviesan el disolvente y se emiten a la atmósfera. Al final del proceso el disolvente se encuentra rico en CO₂ y se regenera mediante calor o presión, dependiendo del disolvente. El CO₂ capturado es separado del absorbente y se captura mientras que el absorbente se recicla.

²⁶² MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 17.

7.2 TRANSPORTE DE CO₂

Es posible que en el lugar donde se produce el proceso de captura, no se pueda realizar la inyección o el respectivo almacenamiento por no existir la formación adecuada para el dióxido de carbono. Por eso, Aguinaco²⁶³ informa que se debe transportar hasta el lugar donde el almacenamiento será llevado a cabo, ya sea por camiones, tuberías o gasoductos. El dióxido de carbono se transporta en tres estados: gas, sólido y líquido; el gas que es transportado a una presión cercana a la atmosférica ocupa un volumen grande y por lo tanto se requieren instalaciones acordes a ello, mientras que si se comprime, ocupa menos volumen y facilita su transporte por tubería. Inclusive, según Metz²⁶⁴, se puede reducir aún más el volumen por medio de la licuefacción, solidificación o hidratación; la primera es una tecnología establecida para el transporte de gas por buque como lo es el GLP (gas licuado de petróleo) y el GNL (gas natural licuado); la segunda, la solidificación necesita más energía en comparación a las otras opciones por lo que genera desventaja desde el punto de vista económico.

Asimismo, Metz²⁶⁵ comunica que los gasoductos funcionan para mercados maduros y son el método de transporte más común de dióxido de carbono; en ocasiones el transporte por buque puede resultar más atractivo desde el punto de vista económico, especialmente si son largas distancias o a ultramar. El precio varía según el tipo de transporte, ya sea por gasoducto en tierra o mar, o buque; en cada caso, depende de la distancia y cantidad transportada; en cuanto a los gasoductos dependen de su ubicación, si se encuentran en tierra o en mar. Cuando se trata de almacenamiento oceánico, según Metz²⁶⁶, depende del tipo de inyección y se puede desde un buque flotante estacionario, uno en desplazamiento o un gasoducto desde la costa.

Primero que todo, se debe comprimir para reducir el volumen del gas al transportarlo, el volumen de la fase densa, la comprimida, es alrededor del 0.2% de la fase gaseosa y también se debe mantener la presión necesaria, la cual como lo hace saber Aguinaco²⁶⁷, es mayor a 8MPa, para evitar regímenes de flujo de dos fases y aumentar la densidad del CO₂, facilitando así su transporte; razón por

²⁶³ AGUINACO, Vicente. Captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Academia de Ingeniería. 2008. 49p.

²⁶⁴ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 181.

²⁶⁵ METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Op. Cit., p. 29.

²⁶⁶ *Ibíd.*, p. 30.

²⁶⁷ AGUINACO, Vicente. Op. Cit., p. 14.

la cual se debe estudiar las pérdidas de carga que pueda sufrir desde el punto de captura hasta el de inyección.

Para el diseño de gasoductos se tienen en cuenta factores físicos, ambientales y sociales; ello incluye una definición de sistema para la ruta preliminar, aspectos de diseño para estimar los costos y definición de conceptos; la topografía y las características físicas de la mezcla que será transportada es de suma importancia, su tamaño óptimo, la presión de la tubería y el diseño mecánico, lo que incluye las válvulas, bombas, compresores, entre otros. Se debe tener en cuenta, de acuerdo a Metz²⁶⁸, que los datos ambientales locales, tales como la variación anual de la temperatura, la actividad sísmica, corrientes marinas, la formación de hielo, el crecimiento biológico, los acuíferos y demás consideraciones como los hábitats protegidos, etc. Y para el diseño conceptual lo que se requiere es el diseño mecánico, el de estabilidad, la protección contra la corrosión y, el zanqueo, el cual es realizar cortes (zanjas) y extracción de tierra para su posterior relleno. Su procedimiento es similar al de la construcción de un oleoducto o gasoducto para la industria del petróleo y gas.

Para los buques, como el dióxido de carbono es capturado continuamente, se necesita de un almacenamiento temporal en tierra y una instalación de carga acorde a Metz²⁶⁹, es necesario planear la capacidad, la velocidad, el número de buques y el calendario de embarque, todo teniendo en cuenta la tasa de captura de CO₂, la distancia a transportar, las restricciones sociales y técnicas; similares a las de transporte de GLP por barco. Ya para la parte de entrega, depende si es en tierra o en mar, si es en tierra el CO₂ es descargado en tanques de almacenamiento temporal y si es en mar, como ocurre con el almacenamiento oceánico, los buques pueden descargar a una plataforma, a una instalación de almacenamiento flotante o directamente a un sistema de almacenamiento. Para su diseño, se basan en el Código Internacional de Transportistas de Gas, para evitar el daño secundario por accidentes.

Hay tres tipos de estructura de tanques para transportar el gas líquido según Metz²⁷⁰:

- Presión: diseñado para evitar que el gas de carga hierva bajo condiciones de aire ambiente.

²⁶⁸ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 184.

²⁶⁹ *Ibíd.*, p. 186.

²⁷⁰ *Ibíd.*, p. 186.

- Baja temperatura: diseñado para funcionar a una temperatura lo suficientemente baja como para mantener el gas como líquido bajo la presión atmosférica.
- Refrigerado: se diseña teniendo en cuenta las condiciones combinadas de temperatura y presión necesaria para que el gas se mantenga como líquido.

Para su construcción, la tecnología necesaria es la misma que para la de los vehículos de gas licuado existentes, su tiempo será de 1-2 años dependiendo su tamaño. Para su carga, el líquido se pasa desde el sitio de su almacenamiento temporal hasta el tanque de carga gracias a unas bombas adaptadas para su operación a alta presión y baja temperatura; los tanques se llenan primero y se presurizan con CO₂ gaseoso para evitar la contaminación por el aire húmedo y la formación de hielo seco; luego en su transporte, la transferencia de calor desde el medio ambiente a través de la pared del tanque ocasiona que el CO₂ hierva lo que eleva la presión en el tanque, para soportarlo, el tanque debe estar bien diseñado.

Posteriormente, como lo hace saber Metz²⁷¹, el CO₂ en fase líquida se descarga en el lugar de destino de manera tal que el aire húmedo no contamine los tanques; y por último, el regreso al puerto y acoplamiento en seco, el buque vuelve al puerto para su próximo viaje, donde es reparado o inspeccionado regularmente, el gas remanente en el buque debe ser purgado con aire para un trabajo seguro.

7.3 ALMACENAMIENTO DE CO₂

Ya que el dióxido de carbono ha sido capturado y transportado, como lo explica Muñoz²⁷², se procede a almacenarse o utilizarse como materia prima; la mayoría es almacenada puesto a que la demanda para su uso es inferior al nivel de emisiones. Para el adecuado almacenamiento se requiere de un conocimiento profundo del subsuelo, de las tecnologías que facilitarán la actividad y confirmar la idoneidad. Hay varias opciones de almacenamiento, como lo afirma Metz²⁷³, la primera propuesta fue la inyección en el océano en aguas profundas, donde se pensaba que permanecería durante siglos; después se habló de almacenamiento en formaciones geológicas que cuenten con la debida capacidad; esta última implica una tecnología similar a la utilizada en la industria del petróleo y el gas, por los pozos se inyecta el gas de la misma manera que se ha inyectado el CO₂ para la recuperación mejorada de petróleo desde el año 1970, lo que conduce a una mayor producción del hidrocarburo y compensación de costos; a esta idea se le sumó otra, que es la inyección a formaciones salinas o en capas de carbón profundas.

²⁷¹ *Ibíd.*, p. 187.

²⁷² MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. *Op. Cit.*, p. 50.

²⁷³ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. *Op. Cit.*, p. 60.

7.3.1 Almacenamiento geológico. Se plantea para las formaciones geológicas a más de 800m de profundidad, donde las condiciones de presión y temperatura dan lugar a que el CO₂ se encuentre en fase líquida, donde se retuvieron o retienen fluidos, como lo son los yacimientos de gas y petróleo, los acuíferos salinos profundos, y las capas de carbón profundas, en todos los casos de acuerdo a Muñoz²⁷⁴, el almacenamiento se consigue mediante la inyección en forma condensada, como se observa en la figura 52 y 53 a continuación.

Esta forma de almacenamiento, como lo dice Metz²⁷⁵, proporciona una manera de evitar la emisión de CO₂ a la atmósfera. El subsuelo es el mayor reservorio de carbono de la Tierra, se encuentra carbón, petróleo, gas y rocas carbonatadas. En los años setenta se propuso la idea del almacenamiento geológico de CO₂, en ese entonces no tuvo mucha investigación, ya en los 1990's, gracias a un grupo de investigadores, la teoría ganó credibilidad. En el año 1996, Statoil y sus socios iniciaron el primer proyecto de almacenamiento a gran escala del mundo en el campo de gas Sleipner en el Mar del Norte; razón por la cual se tiene experiencia útil, además de ello, a finales de los 1990's, varias compañías petroleras empezaron a interesarse por dicho almacenamiento como opción de mitigación para campos con alto contenido de dióxido de carbono debido a que a medida que la investigación progresa y las demostraciones comerciales han tenido éxito, ha cogido confianza; también hay consenso en que elimina una amplia gama de opciones de mitigación y además, puede ayudar a realizar reducciones de las emisiones atmosféricas de CO₂.

El intervalo perforado donde se realiza la inyección tiene de 10-100m de grosor, dependiendo la permeabilidad y espesor de la formación; la inyección eleva la presión cerca al pozo lo que permite que el CO₂ entre a los poros inicialmente ocupados por otros fluidos; la cantidad y distribución dependerá de las propiedades del yacimiento, según dice Metz²⁷⁶. Hay evidencia que indica que los hidrocarburos y otros gases y fluidos, incluyendo el dióxido de carbono, pueden permanecer atrapados durante millones de años; por ejemplo, algunas petroleras de clase mundial tienen tiempos de almacenamiento de petróleo y gas de 5-100 millones de años y otras de 350 millones de años. Sin embargo, como lo afirma Metz²⁷⁷, algunas trampas naturales tienen fugas, lo que requiere una selección cuidadosa a la hora de escoger el sitio y las prácticas de inyección.

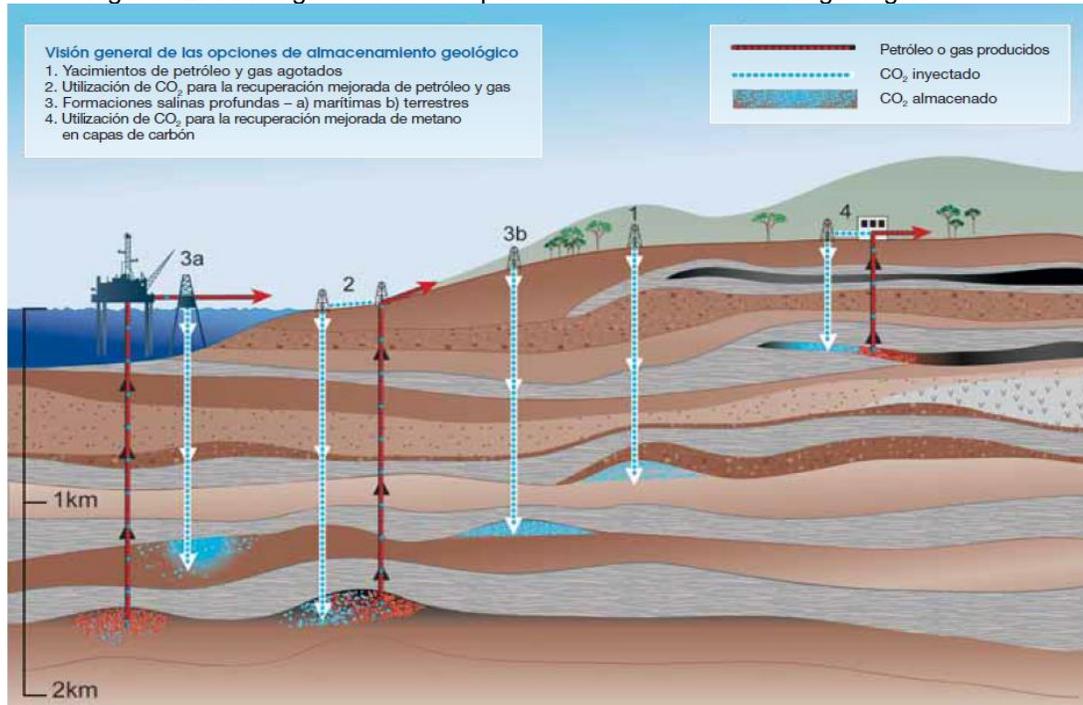
²⁷⁴ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 55.

²⁷⁵ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 200.

²⁷⁶ *Ibíd.*, p. 205.

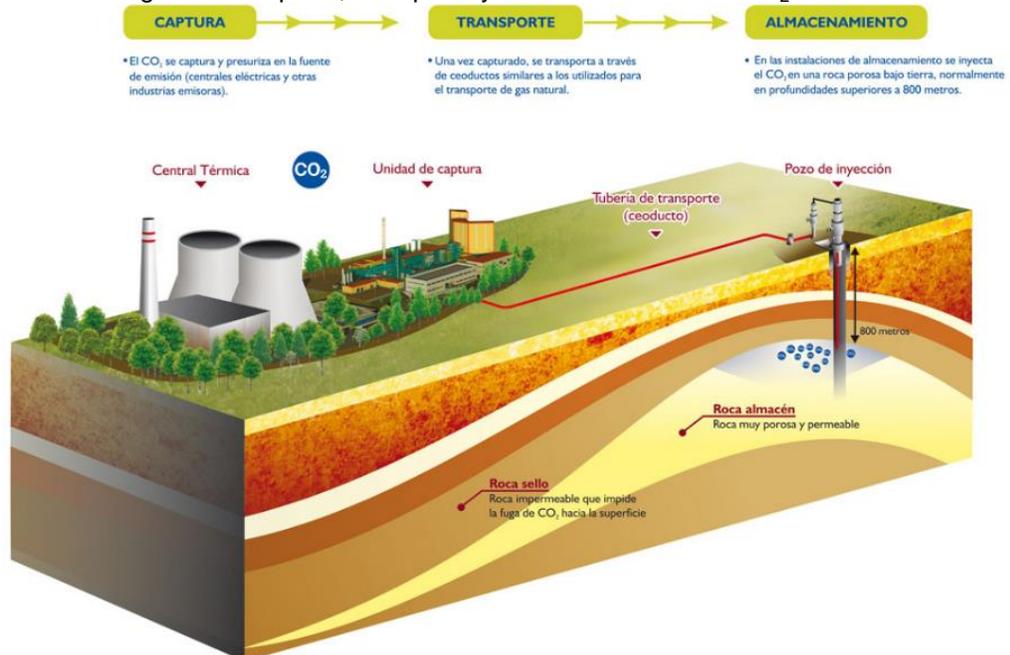
²⁷⁷ *Ibíd.*, p. 212.

Figura 52. Visión general de las opciones de almacenamiento geológico



Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.31. ISBN: 92-9169-319-7.

Figura 53. Captura, transporte y almacenamiento de CO₂



Fuente: CIUDAD DE LA ENERGÍA (CIUDEN). Captura, transporte y almacenamiento. . [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <http://ciuden.es/index.php/es/tecnologias/tecnologias-cac>

Hay varias regiones sedimentarias adecuadas para el almacenamiento de CO₂, según Metz²⁷⁸, para que sean aptas deben cumplir con una capacidad e inyectividad adecuada, tener una roca sello buena o una unidad de confinamiento y poseer un medio geológico suficientemente estable para evitar comprometer la integridad del sitio; y los criterios para evaluar la adecuación de la locación incluyen la madurez de la industria, la infraestructura, las características de la cuenca, tales como la actividad tectónica, tipo de sedimento, regímenes geotérmicos e hidrodinámicos; las cuestiones sociales como el nivel de desarrollo, economía, preocupaciones ambientales y educación pública.

La adecuación de la formación para el almacenamiento depende de su ubicación en la placa continental, si se encuentra en el centro del continente o cerca a los bordes de placas, es conveniente debido a que son estables y por su estructura. Éstas, de acuerdo a Chiodini²⁷⁹, se encuentran en la mayoría de continentes y alrededor de los océanos Atlántico, Ártico e Índico. Las cuencas que se encuentran en zonas tectónicamente activas, como las que rodean el océano Pacífico o en el norte del mediterráneo, son menos adecuadas debido al potencial de fugas del gas; sin embargo, las cuencas deben evaluarse individualmente.

La eficacia del almacenamiento geológico depende de los mecanismos físicos y geoquímicos y aumenta con el aumento de la densidad del dióxido de carbono; los lugares más eficaces son aquellos donde el CO₂ queda inmóvil, ya que queda permanentemente bajo un sello de baja permeabilidad o se convierte en minerales sólidos o se adsorbe sobre las superficies de carbón. En la figura 54 se muestra cuáles son las opciones acorde a la seguridad que brinda el mecanismo de almacenamiento geológico a lo largo del tiempo desde su inyección. Los mecanismos son los siguientes según Metz²⁸⁰:

- a. Trampas físicas - estratigráficas y estructurales: es el principal medio para almacenar CO₂ en formaciones geológicas, pero se debe tener cuidado de no sobrepasar la sobrepresión permitida para evitar una fractura en la roca sello o la reactivación de las fallas.
- b. Trampas físicas – hidrodinámicas (saturación residual de CO₂): las formaciones no tienen una trampa cerrada y cuando el gas es inyectado en la formación, desplaza el agua de la formación salina, haciéndola migrar hacia

²⁷⁸ *Ibid.*, p. 213.

²⁷⁹ CHIODINI, G., *et al.* CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *En: Journal of Geophysical Research: Solid earth*. Vol.106, 2001 citado por METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 213p. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

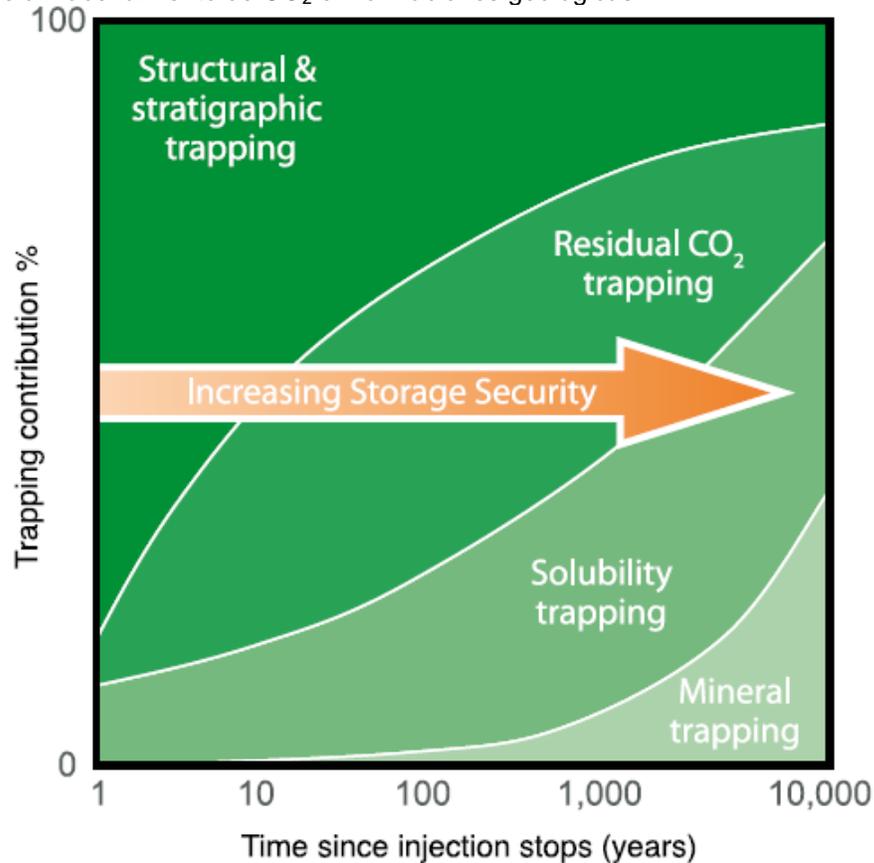
²⁸⁰ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 208.

arriba, después cuando alcanza la parte superior de la formación, continúa migrando como fase separada hasta que queda atrapada como saturación residual de CO₂.

- c. Trampas geoquímicas (solubilidad-mineral): En la sub-superficie, el dióxido de carbono puede experimentar unas interacciones geoquímicas con la roca y el agua de formación que aumenta la capacidad y eficacia del almacenamiento. Cuando el CO₂ se disuelve con el agua de la formación se produce un proceso llamado solubilidad. Su principal ventaja es que cuando el gas se disuelve, ya no existe una fase separada, lo que elimina las fuerzas de flotación y pueden convertirse finalmente en minerales de carbono estables, que es la forma permanente de almacenamiento geológico.

Se cree que la trampa de minerales es lenta, tomándose desde un milenio o más, sin embargo, la permanencia de almacenamiento es la mayor, lo que hace que sea deseable a largo plazo.

Figura 54. Seguridad del almacenamiento geológico dependiendo del mecanismo de almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 208. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

7.3.1.1 Yacimientos de gas y petróleo agotados. Los yacimientos ya agotados o en fase de agotamiento son tenidos en cuenta para este tipo de almacenamiento. La industria petrolera en la recuperación secundaria, ha utilizado la táctica de inyectar en el subsuelo gases durante décadas. Conforme Metz²⁸¹, Es el primer candidato a escogerse ya que el petróleo y el gas originalmente acumulados en esos sitios, no escaparon durante millones de años, lo que demuestra su integridad geológica; también se cuenta con la estructura y las propiedades físicas las cuales han sido previamente estudiadas y evaluadas, además, se han desarrollado modelos informáticos que predicen el desplazamiento y la captura de hidrocarburos, y por último, algunas de las infraestructuras ya existentes pueden utilizarse para el manejo de las operaciones de almacenamiento de CO₂.

Cuenta con ciertas ventajas como lo hace saber Muñoz²⁸²:

- Logra alargar la vida útil de los yacimientos debido a que incrementa el factor de recuperación original.
- Mejora la relación costo/beneficio.
- Eficacia y seguridad.
- Conocimiento de las propiedades y características geológicas y físicas del yacimiento.
- No afecta negativamente a los campos empobrecidos.

Asimismo, Muñoz²⁸³ informa algunas desventajas:

- En yacimientos antiguos, existe la posibilidad de tener fugas a través de los pozos abandonados.
- En algunos casos, la reducción de la presión del yacimiento durante la etapa de producción y la presurización posterior por la inyección del gas podría romper la integridad del sello del yacimiento.
- Podría llegar a ser competencia de los pozos inyectores de gas natural en zonas con escasez de almacenes geológicos.
- Se requiere de ciertas características en los yacimientos, de presión, temperatura y profundidad.

7.3.1.2 Formaciones salinas. Están constituidas por rocas sedimentarias porosas y permeables que contienen agua salada, también llamada salmuera;

²⁸¹ *Ibíd.*, p. 215.

²⁸² MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. *Op. Cit.*, p. 57.

²⁸³ *Ibíd.*, p. 57.

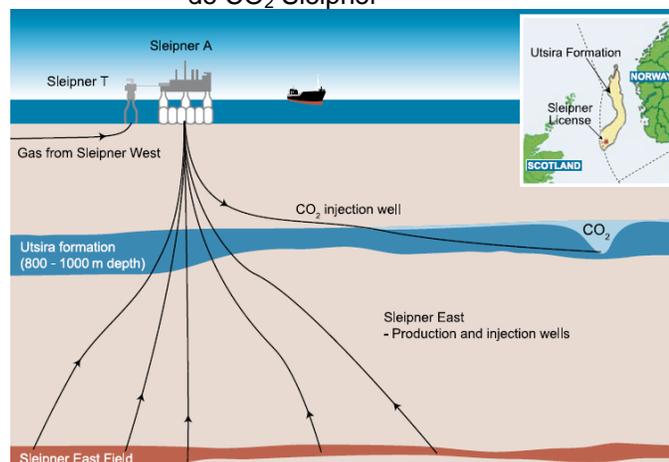
según manifiesta Espie²⁸⁴, normalmente se encuentran en profundidades mayores a los 800m, donde están estructuralmente aisladas; éstas representan el volumen de almacenamiento potencial más grande de todo el mundo.

Sus características de acuerdo a Muñoz²⁸⁵ son las siguientes:

- Porosidad y permeabilidad adecuada.
- Existencia de una capa suprayacente e impermeable al flujo vertical.
- Estar ubicados en áreas geológicamente estables.
- Tener un tamaño lo suficientemente grande como para almacenar lo requerido de CO₂.
- Profundidad suficiente, usualmente, por debajo de los 800m.

El proyecto Sleipner en el Mar del Norte es el mejor ejemplo de este tipo de almacenamiento, de acuerdo a Metz²⁸⁶, fue el primer proyecto a escala comercial, como se muestra en la figura 55, se ilustra un diagrama simplificado y el recuadro que contiene es de la ubicación y extensión de la formación Utsira. Allí se elimina aproximadamente 1MtCO₂ anualmente, su operación inició en el año 1996 y se espera que almacene un total de 20MtCO₂, el dióxido de carbono se inyecta en arenas mal cementadas que se encuentran a 800-1000m debajo del fondo marino.

Figura 55. Diagrama simplificado del proyecto de almacenamiento de CO₂ Sleipner



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 202. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

²⁸⁴ ESPIE, A.A. CO₂ Capture and Storage: Contributing to sustainable world growth. International Petroleum Technology Conference. 2005. p. 4.

²⁸⁵ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 58.

²⁸⁶ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 217.

7.3.1.3 Capas de carbón profundas. El carbón contiene fracturas, también llamadas grapas, entre ellas hay micro-poros en los cuales las moléculas de gas pueden difundirse y ser adsorbidas, como indica Metz²⁸⁷, puede contener hasta 25m³ de metano por tonelada de carbón a presión atmosférica y 0°C; tiene mayor afinidad para adsorber CO₂ gaseoso, una vez este es inyectado a través de los pozos, fluirá a través del sistema de grapas del carbón, se difunda en la matriz y se adsorbe sobre las superficies de micro-poros de carbón, causando una liberación de gases con menor afinidad al carbón, es decir, metano. A medida que el carbón adsorbe y/o absorbe el CO₂, se hincha, lo que reduce la permeabilidad y la inyectividad.

Tiene ciertas ventajas:

- Amplio conocimiento, identificación y caracterización de las cuencas.
- Económicas.
- Mejora la relación coste/beneficio.
- Menores costes exploratorios al estar las cuencas de carbón identificadas.
- Mayor seguridad de almacenamiento.

Y desventajas:

- Menor capacidad de almacenamiento respecto a las otras opciones.
- Hinchamiento del carbón a medida que absorbe/adsorbe el CO₂

Algunas de sus características son:

- Permeabilidad adecuada.
- Geometría del carbón, se prefiere unas grapas gruesas en lugar de múltiples y finas.
- Estructura simple.
- Grapas homogéneas y confinadas.
- Profundidad.
- Condiciones de saturación de gas.
- Capacidad para deshidratar la formación.

Si el carbón no es extraído o despresurizado, es probable que el CO₂ se almacene por tiempo geológico; pero en palabras de Metz²⁸⁸, al igual que con las otras opciones de almacenamiento, cualquier perturbación en la formación podría anular la acumulación.

²⁸⁷ *Ibíd.*, p. 217.

²⁸⁸ *Ibíd.*, p. 219.

7.3.2 Almacenamiento oceánico. Esta técnica de almacenamiento según Muñoz²⁸⁹, consiste en inyectar el dióxido de carbono directamente en el fondo oceánico, es decir, a una profundidad de más de 1000m; como lo hace saber Metz²⁹⁰, sigue en escala experimental e investigación, no obstante, se han realizado experimentos sobre terreno a pequeña escala, así como 25 años de estudios teóricos, de laboratorio y modelos del almacenamiento intencional de CO₂, pero aun así hay poca experiencia con el manejo del dióxido de carbono en lo profundo del mar, se requiere de un mayor desarrollo y pruebas de campo; además, los océanos profundos se encuentran alejados de muchas fuentes del gas, lo que demanda que el transporte se realice por buques o por oleoductos en aguas profundas. Como lo enuncia Metz²⁹¹, la industria del petróleo con el paso del tiempo alcanza mayor profundidad en sus actividades, pero no la necesaria para este tipo de almacenamiento.

La realización de esta práctica se trata en poner el CO₂ directamente en o sobre el océano profundo o fondo marino, una vez liberado, se disuelve en el agua del mar, se dispersa y se convierte en parte del ciclo del carbono, lo que significa que el ambiente químico será alterado inmediatamente. Acorde a Metz²⁹², no hay límite físico de la cantidad de dióxido de carbono que pueda almacenarse en el océano, sin embargo, la cantidad dependerá del equilibrio con la atmósfera y de factores ambientales tales como el máximo cambio de pH admisible; esa capacidad de absorber CO₂ en equilibrio con la atmósfera es función de la química del mar; esa velocidad depende del intercambio de carbono inorgánico disuelto entre las aguas superficiales y profundas del océano; su eficacia está relacionada con el tiempo que permanece el gas aislado de la atmósfera.

Este tipo de almacenamiento sigue en investigación, no se han realizado modelos a escala; en la tabla 5 algunos proyectos dicen que tienen almacenamiento oceánico, pero es en formaciones debajo del fondo marino, es decir, un almacenamiento geológico. Como manifiesta Metz²⁹³, años atrás, un consorcio internacional de ingenieros oceanógrafos y ecólogos realizaron una propuesta para un experimento de liberar no más de 60 toneladas de CO₂ líquido en el océano profundo cerca de la costa de Kona de la isla de Hawái, pero por oposición de organizaciones ambientalistas, no salieron los permisos necesarios y el

²⁸⁹ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 61.

²⁹⁰ METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Op. Cit., p. 37.

²⁹¹ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 281.

²⁹² *Ibíd.*, p. 282.

²⁹³ *Ibíd.*, p. 285.

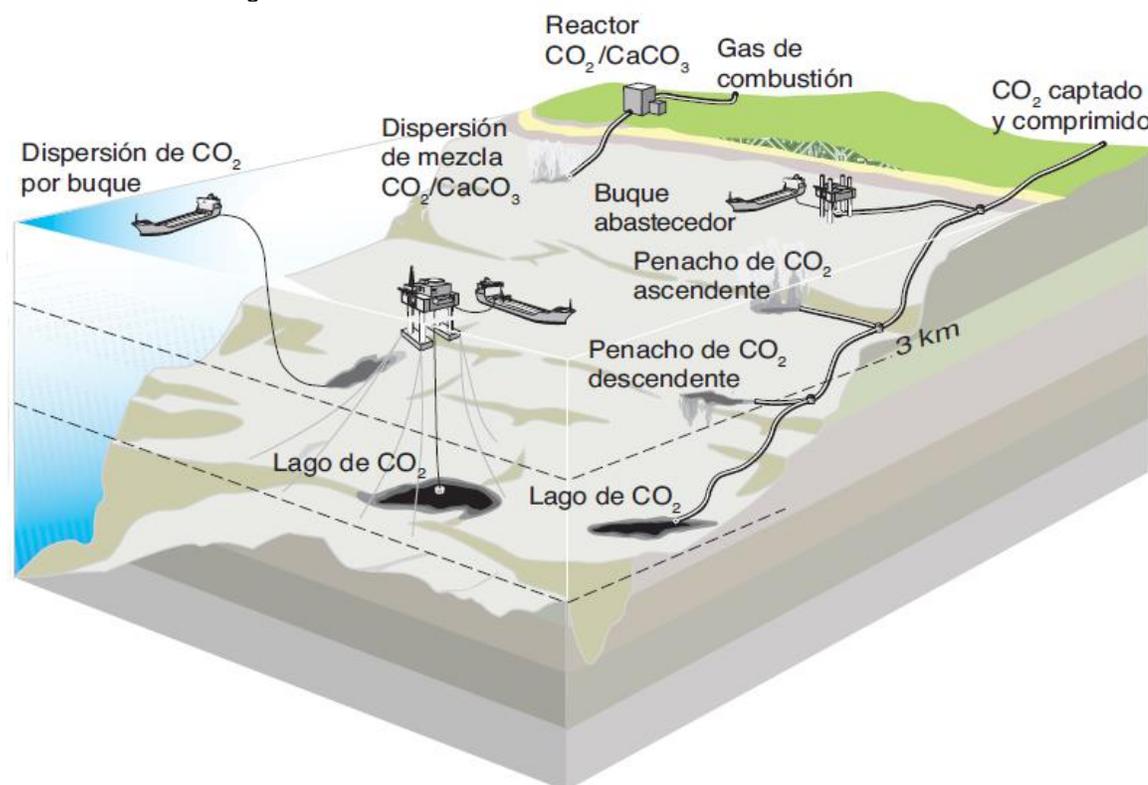
experimento no se pudo realizar; después de ello, el grupo elaboró otro plan para liberar 5.4 toneladas de CO₂ licuado a 800 metros de profundidad frente a la costa de Noruega, dicho procedimiento se supervisó; como resultado en una audiencia pública se dijo que el uso del mar como almacenamiento de dióxido de carbono es controvertido y el Ministro de Medio Ambiente noruego anunció que el proyecto no se llevaría a cabo. Sin embargo, se han realizado más experimentos a menor escala (menos de 100 litros de CO₂).

El dióxido de carbono se comporta y se disuelve diferente dependiendo la fase en la cual se libere y el método utilizado, a continuación se explica el comportamiento dependiendo la fase según Metz²⁹⁴ y en la figura 56 se ilustran los métodos de almacenamiento oceánico.

- Gas: puede ser liberado por encima de una profundidad de 500m, debido a que debajo de esta, las presiones son demasiado grandes como para que el CO₂ exista como gas, las burbujas de gas serían menos densas que el mar, lo que las haría elevarse hacia la superficie, disolviéndose a una velocidad mayor, aproximadamente, 0.1cm/hora. En aguas frías, de temperaturas menores a 9°C, podrían formarse una película de hidratos en la pared de la burbuja.
- Líquido: por debajo de los 500m, el CO₂ puede existir como líquido y a más de 2500m el CO₂ es menos denso que el agua, por lo que tendería a subir. Debido a que a esa profundidad la temperatura es aproximadamente 9°C, hay tendencia en formar hidratos en la pared de las gotas y si la gota alcanza los 500m se puede convertir en una burbuja de gas, en esas condiciones, la velocidad de disminución del radio de una gota es cerca de 0.5cm/hora. El dióxido de carbono es más compresible que el agua de mar, por ende, debajo de 3000m de profundidad, el CO₂ líquido es más denso por lo cual se hundiría. Las boquillas a utilizar se diseñarían de tal forma que produzcan gotas grandes que se hundan o pequeñas gotas que se disuelvan en el agua antes de entrar en contacto con el fondo marino.
- Sólido: es más denso que el agua de mar, por lo que tiende a hundirse; se disuelven en aproximadamente 0.2cm/hora, por lo tanto, pequeñas cantidades pueden disolverse completamente antes de llegar al fondo marino y las grandes podrían llegar sin disolverse del todo.
- Hidrato: es una forma en la cual moléculas de agua rodean cada molécula de CO₂, puede formarse en aguas oceánicas a una profundidad por debajo de 400m. Un hidrato totalmente formado es más denso que el agua de mar, por lo que se hundiría y se disolvería a una velocidad de 0.2cm/hora.

²⁹⁴ Ibid., p. 285-287.

Figura 56. Métodos de almacenamiento oceánico

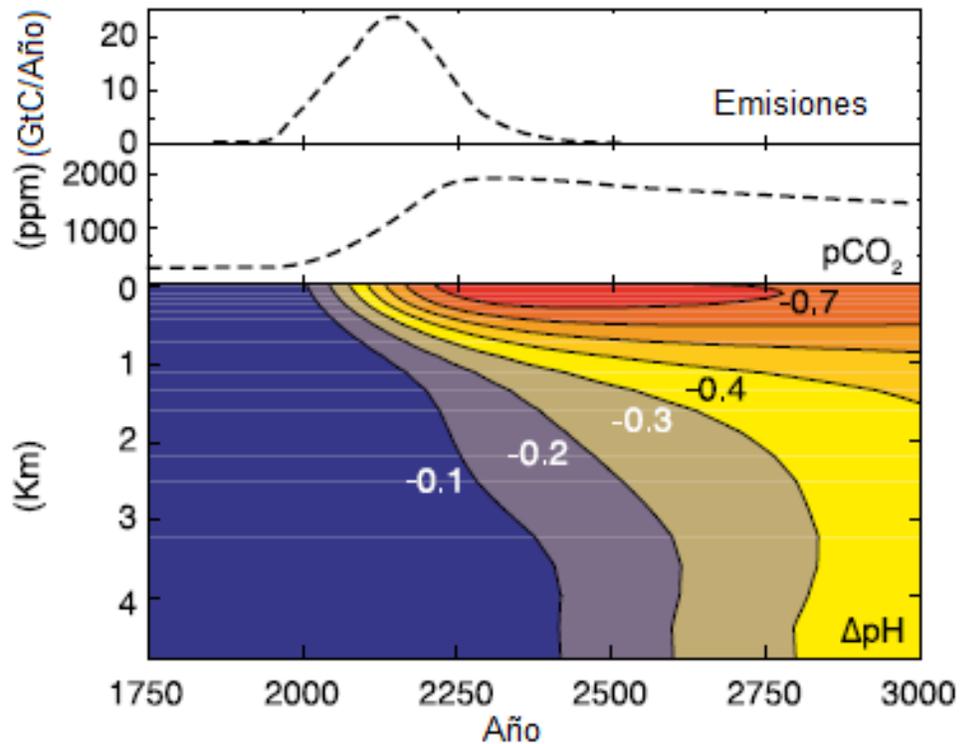


Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.37. ISBN: 92-9169-319-7.

En palabras de Metz²⁹⁵, hay modelos que dicen que el CO₂ quedará aislado de la atmósfera por cientos de años y que la fracción retenida tiende a ser mayor a más profundidad. La captación de dióxido de carbono antropogénico por el océano ha provocado perturbaciones en la química de las aguas superficiales, en el pH, éste ha disminuido lo que causa la acidez del agua, eventualmente, esto alcanzará el océano profundo. En la figura 56 se puede ver una simulación del cambio en el pH del océano acorde pasa el tiempo y la concentración del gas.

²⁹⁵ METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Op. Cit., p. 38.

Figura 56. Simulación del cambio del pH oceánico por las emisiones de CO₂



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 282. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

7.3.3 Carbonatación mineral. Radica en la fijación del CO₂ en rocas de silicatos a través de la reacción química que se produce con los óxidos alcalinos y alcalinotérreos, formando compuestos como el carbonato de magnesio y el carbonato de calcio. Como lo manifiesta Muñoz²⁹⁶, éste proceso ocurre en la naturaleza de manera continua pero lenta, es conocido como meteorización.

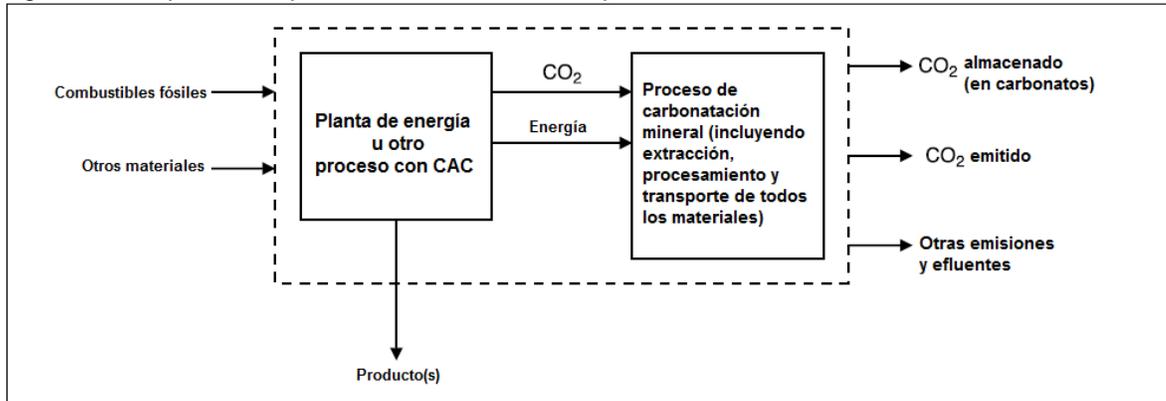
En la figura 57 se esquematiza el proceso de carbonatación mineral para una planta de energía con CAC, frente a ese esquema se puede aplicar a cualquier otro proceso con la tecnología. Se observa que los combustibles fósiles aportan energía tanto para la planta de CAC como para el proceso de carbonatación, ya sea directa o indirectamente, las otras emisiones que se ven, se componen de subproductos como sílice y posiblemente agua, así como los insumos no reaccionados. El resultado según Metz²⁹⁷, son carbonatos primeramente y sílice como se nombró, que permanecen estables durante el tiempo y pueden eliminarse

²⁹⁶ MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Op. Cit., p. 63-64.

²⁹⁷ METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Op. Cit., p. 39.

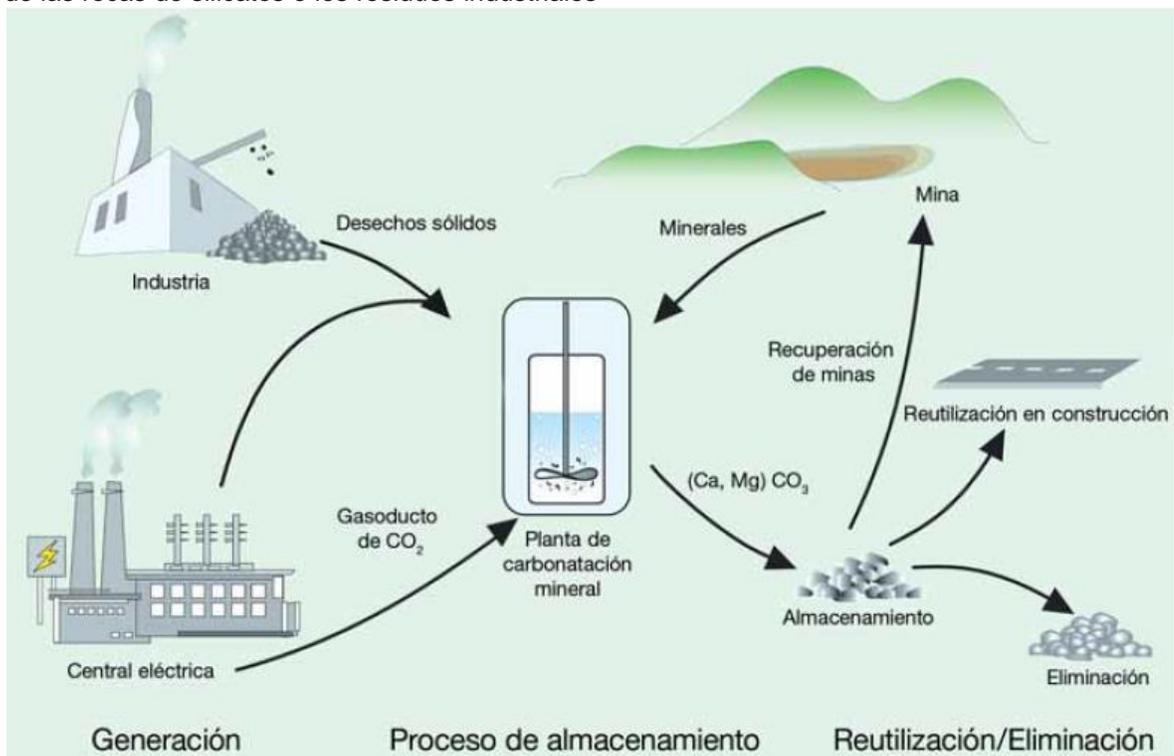
en zonas como las minas de silicato o reutilizarse con fines de construcción como se muestra en la figura 58.

Figura 57. Esquema del proceso de carbonatación para una central eléctrica con CAC



Fuente: METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 322. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

Figura 58. Flujos de materiales y fases del proceso relacionado con la carbonatación mineral de las rocas de silicatos o los residuos industriales



Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.40. ISBN: 92-9169-319-7.

La tecnología que se tiene demanda bastante energía para impulsar el proceso de carbonatación mineral; para este se necesita de primero, la preparación de reactivos sólidos, lo que incluye la minería, transporte, trituración y activación cuando sea necesario; segundo, la transformación, incluida la energía asociada al uso, reciclado y posibles pérdidas de aditivos y catalizadores; y por último, la eliminación de carbonatos y subproductos. A pesar de su demanda energética, según indica Metz²⁹⁸, este tipo de almacenamiento despierta cierto grado de interés por dos factores, el primero es por su abundancia de materiales que portan óxidos metálicos, y segundo, por su permanencia del almacenamiento en forma sólida estable.

7.3.4 Usos industriales. Como otra alternativa de almacenamiento a la geológica, oceánica y carbonatación mineral, se tiene ésta opción. Se puede utilizar el dióxido de carbono para el tratamiento de alimentos, sistemas de refrigeración, limpieza en seco, extintores, procesos de tratamiento de agua, para fijar la biomasa para su posterior utilización para la producción de biocombustibles u otros usos, también para la producción de urea y metanol. Metz²⁹⁹ estima que la mayor parte de CO₂ destinada para este fin se emplea para la urea que sirve para la fabricación de fertilizantes y otros productos.

Lo anterior se puede realizar solo si se cumplen los siguientes criterios, indica Metz³⁰⁰:

1. El uso de CO₂ no debe reemplazar una fuente del mismo que luego sea venteadada a la atmósfera.
2. Los compuestos producidos deben tener una vida útil larga antes de que el CO₂ se libere por combustión u otros procesos de degradación.
3. El límite general del sistema debe ser cuidadosamente definido para incluir todos los materiales, flujos de energía, emisiones y demás en la cadena de procesos para producir una unidad de producto para poder determinar correctamente el CO₂ total evitado.

Actualmente, de acuerdo a Metz³⁰¹, se utiliza para los procesos previamente nombrados y como nuevos se considera para productos químicos y polímeros

²⁹⁸ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 323.

²⁹⁹ METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Op. Cit., p. 41.

³⁰⁰ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 330-331.

orgánicos, para la producción de combustible mediante el CO₂ y captura del mismo en biomasa.

A continuación, en la tabla 4, se encuentra un resumen de todo lo nombrado a lo largo del presente capítulo; la captura, el transporte y el almacenamiento, tanto geológico, oceánico, carbonatación mineral e usos industriales; cada uno con su estado de madurez, donde se encuentra la X es el nivel más elevado. Se evidencia que el almacenamiento oceánico sigue en fase de investigación por factores económicos y ambientales; asimismo, el almacenamiento geológico es el que mayor desarrollo ha tenido en comparación con los demás, por su facilidad de procesamiento y experiencia de las industrias.

Tabla 4. Grado actual de madurez de los componentes del sistema de CAC

| Componente de la CAC | Tecnología de CAC | Fase de investigación ^a | Fase de demostración ^b | Económicamente viable en condiciones específicas ^c | Mercado maduro ^d |
|---------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|
| Captación | Posterior a la combustión | | | X | |
| | Previa a la combustión | | | X | |
| | Combustión de oxígeno-gas | | X | | |
| | Separación industrial (refinamiento de gas natural, producción de amoníaco) | | | | X |
| Transporte | Gasoducto | | | | X |
| | Buque | | | X | |
| Almacenamiento geológico | Recuperación mejorada de petróleo | | | | X ^e |
| | Yacimientos de gas o petróleo | | | X | |
| | Formaciones salinas | | | X | |
| | Recuperación mejorada de metano en capas de carbón (ECBM) ^f | | X | | |
| Almacenamiento oceánico | Inyección directa (disolución) | X | | | |
| | Inyección directa (lago) | X | | | |
| Carbonatación mineral | Minerales silicatos naturales | X | | | |
| | Materiales de desecho | | X | | |
| Usos industriales del CO ₂ | | | | | X |

Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.20. ISBN: 92-9169-319-7.

Dónde:

- Fase de investigación: se entiende que la ciencia básica se ha comprendido, la tecnología está en etapa de diseño conceptual o prueba de nivel laboratorio y no ha sido objeto de demostración en una central experimental.

³⁰¹ *Ibíd.*, p. 333.

- b. Fase de demostración: se ha desarrollado y puesto en práctica a escala de una central experimental, pero requiere de un mayor desarrollo antes de que esté lista para el diseño y construcción en escala cabal.
- c. Económicamente viable en condiciones específicas: Hay buena comprensión y uso de la tecnología en determinadas aplicaciones comerciales.
- d. Mercado maduro: la tecnología está siendo utilizada con numerosas repeticiones en todo el mundo.

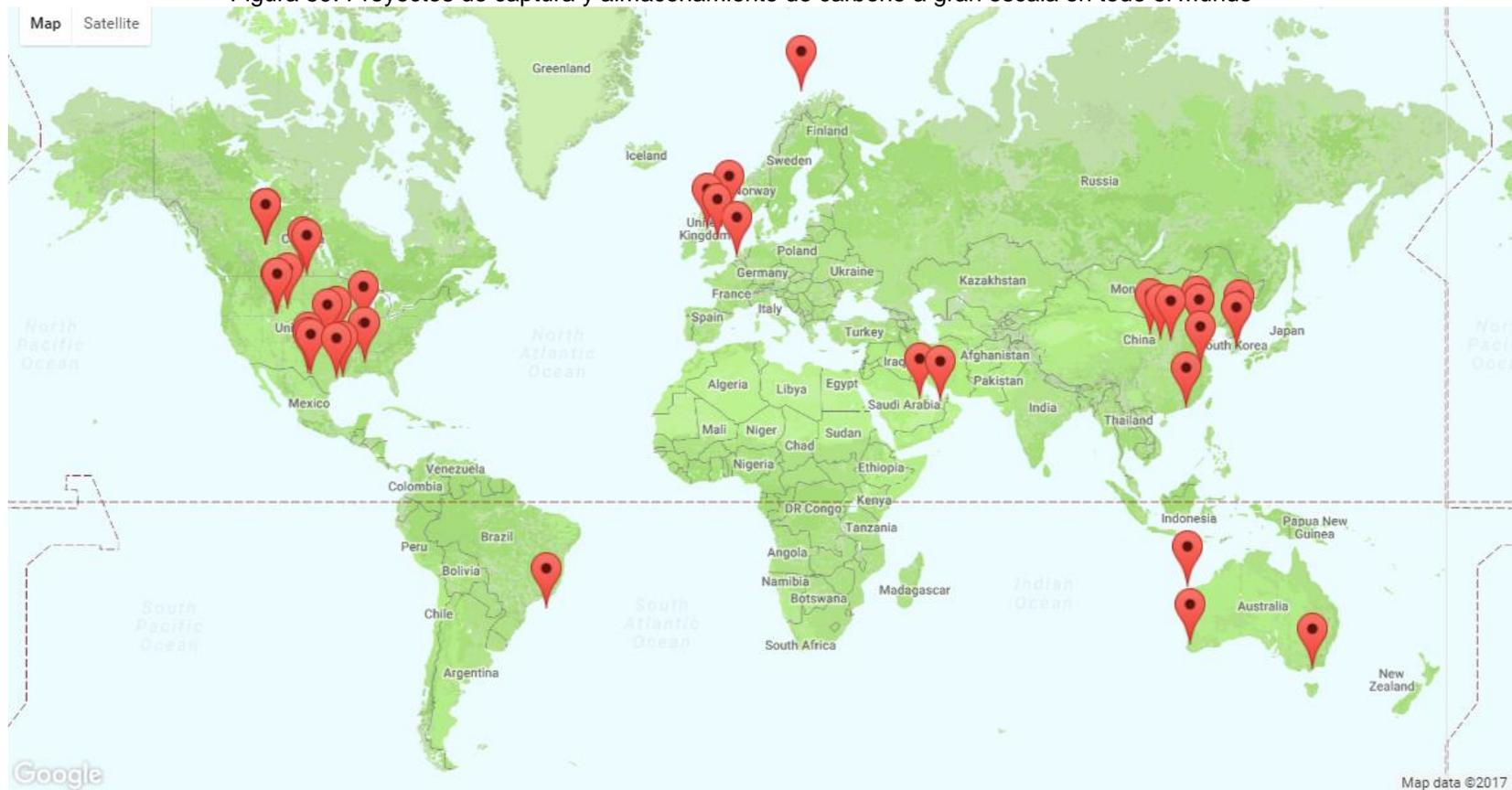
Además, en la figura 59 mostrada a continuación, se ubica con rojo cada proyecto de Captura y Almacenamiento de gran escala en todo el mundo, de la misma forma, en la tabla 5, se nombran los proyectos junto con su etapa del proyecto, país en el que se desarrolla, estado o distrito, la capacidad de captura de dióxido de carbono en toneladas métricas por año, el año del inicio del proyecto, ya sea que se encuentre en funcionamiento o sea una predicción, la industria, el tipo de captura y almacenamiento. Es notable que los proyectos se desarrollan solamente en países industrializados, debido a que son los mayores emisores del gas de interés (CO₂) y son los que cuentan con mayor facilidad para financiar los proyectos de investigación y desarrollo.

En la tabla 5 se encuentran cinco etapas de proyecto relacionadas con la tecnología de captura y almacenamiento de carbono, a continuación están enumeradas según la IEA³⁰², cada una con una breve explicación:

1. Identificando: se establece el alcance preliminar y la estrategia de negocio.
2. Evaluando: se establecen las operaciones de desarrollo y estrategia de ejecución.
3. Definiendo: se finaliza el alcance y el plan de ejecución.
4. Ejecutando: detalles y construcción del activo.
5. Operando: se operan, mantienen y mejoran los activos.

³⁰² INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Francia: MSDS, 2012. p. 102. ISBN: 978-92-64-17488-7

Figura 59. Proyectos de captura y almacenamiento de carbono a gran escala en todo el mundo



Fuente: GLOBAL CCS INSTITUTE. Large Scale CCS Projects. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

Tabla 5. Proyectos de Captura y Almacenamiento de Carbono a gran escala a nivel mundial

| Nombre del proyecto | Etapas del proyecto | País | Estado/Distrito | Capacidad de captura (Tm/año) | Año | Industria | Tipo de captura | Almacenamiento |
|---|----------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------------|------------|------------------------------|------------------------|---|
| Val Verde Natural Gas Plants | Operando | Estados Unidos | Texas | 1.3 | 1972 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Enid Fertilizer CO2-EOR Project | Operando | Estados Unidos | Oklahoma | 0.7 | 1982 | Producción de fertilizantes | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Shute Creek Gas Processing Facility | Operando | Estados Unidos | Wyoming | 7.0 | 1986 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Sleipner CO2 Storage Project | Operando | Noruega | North Sea | 0.85 | 1996 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale Project | Operando | Canadá | Saskatchewan | 3.0 | 2000 | Gas natural sintético | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Snohvit CO2 Storage Project | Operando | Noruega | Barents Sea | 0.7 | 2008 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Century Plant | Operando | Estados Unidos | Texas | 8.4 | 2010 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Air Products Steam Methane Reformer EOR Project | Operando | Estados Unidos | Texas | 1.0 | 2013 | Producción de hidrógeno | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Coffeyville Gasification Plant | Operando | Estados Unidos | Kansas | 1.0 | 2013 | Producción de fertilizantes | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Lost Cabin Gas Plant | Operando | Estados Unidos | Wyoming | 0.9 | 2013 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |

Tabla 5. (Continuación)

| Nombre del proyecto | Etapas del proyecto | País | Estado/Distrito | Capacidad de captura (Tm/año) | Año | Industria | Tipo de captura | Almacenamiento |
|---|----------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------------|------------|------------------------------|------------------------|--|
| Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS Project | Operando | Brasil | Cuenca de los Santos | Aprox. 1.0 | 2013 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Boundary Dam Carbon Capture and Storage Project | Operando | Canadá | Saskatchewan | 1.0 | 2014 | Generación de energía | Post-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Uthmaniyah CO ₂ -EOR Demonstration Project | Operando | Arabia Saudita | Provincia Oriental | 0.8 | 2015 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Quest | Operando | Canadá | Alberta | Aprox. 1.0 | 2015 | Producción de hidrógeno | Separación industrial | Almacenamiento geológico - formaciones salinas profundas |
| Abu Dhabi CCS Project (Phase 1 being Emirates Steel Industries (ESI) CCS Project) | Operando | Emiratos Árabes | Abu Dhabi | 0.8 | 2016 | Producción de hierro y acero | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Petra Nova Carbon Capture Project | Operando | Estados Unidos | Texas | 1.4 | 2017 | Generación de energía | Post-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Illinois Industrial Carbon Capture and Storage Project | Operando | Estados Unidos | Illinois | 1.1 | 2017 | Producción química | Separación industrial | Almacenamiento geológico - formaciones salinas profundas |
| Gorgon Carbon Dioxide Injection Project | Ejecutando | Australia | Oeste de Australia | 3.4-4.0 | 2017 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Almacenamiento geológico - formaciones salinas profundas |

Tabla 5. (Continuación)

| Nombre del proyecto | Etapas del proyecto | País | Estado/Distrito | Capacidad de captura (Tm/año) | Año | Industria | Tipo de captura | Almacenamiento |
|---|----------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------------|------------|-----------------------------|------------------------|--|
| Kemper County Energy Facility | Ejecutando | Estados Unidos | Mississippi | 3.0 | 2017 | Generación de energía | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with Agrium CO2 Stream | Ejecutando | Canadá | Alberta | 0.3-0.6 | 2018 | Producción de fertilizantes | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with North West Sturgeon Refinery CO2 Stream | Ejecutando | Canadá | Alberta | 1.2-1.4 | 2018 | Refinación de petróleo | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Yanchang Integrated Carbon Capture and Storage Demonstration Project | Ejecutando | China | Provincia Shaanxi | 0.41 | 2018 | Producción química | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Sinopec Qilu Petrochemical CCS Project | Definiendo | China | Provincia Shandong | 0.5 | 2019 | Producción química | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Rotterdam Opslag en Afdwing Demonstratieproject (ROAD) | Definiendo | Países bajos | Zuid-Holland | 1.1 | 2019-20 | Generación de energía | Post-combustión | Almacenamiento oceánico - yacimientos de petróleo y/o gas agotados |
| Texas Clean Energy Project | Definiendo | Estados Unidos | Texas | 2.4 | 2021 | Generación de energía | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| CarbonNet Project | Definiendo | Australia | Victoria | 1.0-5.0 | 2020's | Bajo evaluación | Bajo evaluación | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Sinopec Shengli Power Plant CCS Project | Definiendo | China | Provincia Shandong | 1.0 | 2020's | Generación de energía | Post-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |

Tabla 5. (Continuación)

| Nombre del proyecto | Etapas del proyecto | País | Estado/Distrito | Capacidad de captura (Tm/año) | Año | Industria | Tipo de captura | Almacenamiento |
|---|----------------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------------|------------|---|---------------------------------|--|
| Riley Ridge Gas Plant | Evaluando | Estados Unidos | Wyoming | 2.5 | 2020 | Procesamiento de gas natural | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo |
| Sinopec Eastern China CCS Project | Evaluando | China | Provincia Jiangsu | 0.5 | 2020 | Producción de fertilizantes | Separación industrial | Recuperación mejorada de petróleo |
| Huaneng GreenGen IGCC Project (Phase 3) | Evaluando | China | Tianjin | 2.0 | 2020's | Generación de energía | Pre-combustión | Recuperación mejorada de petróleo, opciones de almacenamiento geológico en revisión |
| Korea-CCS 1 | Evaluando | Korea del sur | Provincia Gangwon o Chungnam | 1.0 | 2020's | Generación de energía | Post-combustión | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Korea-CCS 2 | Evaluando | Korea del sur | Sin decidir | 1.0 | 2020's | Generación de energía | Pre-combustión y oxi-combustión | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Teesside Collective Project | Evaluando | Reino Unido | North Yorkshire | 2.8 | 2020's | Varios | Varios | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Caledonia Clean Energy Project | Evaluando | Reino Unido | Escocia | 3.8 | 2022 | Generación de energía | Pre-combustión | Almacenamiento geológico - formaciones salinas profundas, potencial para recuperación mejorada de petróleo |
| South West Hub | Evaluando | Australia | Oeste de Australia | 2.5 | 2025 | Producción de fertilizantes y generación de energía | Separación industrial | Almacenamiento geológico - formaciones salinas profundas |

Tabla 5. (Continuación)

| Nombre del proyecto | Etapas del proyecto | País | Estado/Distrito | Capacidad de captura (Tm/año) | Año | Industria | Tipo de captura | Almacenamiento |
|---|----------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------|-------------------------|------------------------|---|
| China Resources Power (Haifeng) Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration Project | Identificando | China | Provincia Guangdong | 1.0 | 2020's | Generación de energía | Post-combustión | Almacenamiento oceánico - formaciones salinas profundas |
| Shanxi International Energy Group CCUS project | Identificando | China | Provincia Shanxi | 2.0 | 2020's | Generación de energía | Oxi-combustión | Bajo evaluación |
| Shenhua Ningxia CTL Project | Identificando | China | Región autónoma de Ningxia Hui | 2.0 | 2020's | Carbón-a-líquidos (CTL) | Pre-combustión | Bajo evaluación |

Fuente: GLOBAL CCS INSTITUTE. Large Scale CCS Projects. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

7.4 COSTOS

Para poder realizar toda la operación de captura, transporte y almacenamiento es necesario conocer los costos que ello implica; como se ha nombrado anteriormente, al ser una tecnología que involucra a veces cambio de infraestructura o simplemente, mayor demanda de energía, es posible que incremente el valor. El precio de la tonelada de dióxido de carbono es fluctuante, por ende, cualquier tipo de tecnología basada con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ debe considerar un precio por debajo al de la tonelada.

En la tabla 6 se encuentran los componentes del sistema de captura y almacenamiento de carbono, junto a su escala de costos y observaciones para el año 2002; donde se evidencia que del tipo de almacenamiento el más costoso es el de la carbonatación mineral y el más económico y viable es el geológico. En la tabla 7 se muestra una escala de costos totales correspondientes a la CAC con almacenamiento geológico sobre la base de la tecnología existente para nuevas centrales eléctricas. Acorde a la IEA³⁰³, hay que tener en cuenta que los precios estimados en las tablas irán disminuyendo con el tiempo como resultado del despliegue de la tecnología, junto a mayor investigación y desarrollo.

Tabla 6. Escala de costos correspondientes a los componentes de un sistema de CAC en el 2002

| Componentes del sistema de CAC | Escala de costos | Observaciones |
|---|--|--|
| Captación del CO ₂ emitido en una central eléctrica a carbón o a gas | 15-75 US\$/tCO ₂ captado (neto) | Costos netos del CO ₂ captado en comparación con la misma planta sin captación |
| Captación del CO ₂ emitido en la producción de hidrógeno y amoníaco o el refinamiento de gas | 5-55 US\$/tCO ₂ captado (neto) | Aplicable a las fuentes con alto grado de pureza que requieren un simple secado y compresión |
| Captación del CO ₂ emitido por otras fuentes industriales | 25-115 US\$/tCO ₂ captado (neto) | La escala refleja el uso de diversas tecnologías y combustibles |
| Transport | 1-8 US\$/tCO ₂ transportado (neto) | Por cada 250 km de transporte por gasoductos o buque para un flujo másico de 5 (extremo superior) a 40 (extremo inferior) MtCO ₂ /año |
| Almacenamiento geológico ^a | 0,5-8 US\$/tCO ₂ inyectado (neto) | Con exclusión de los ingresos potenciales generados por la recuperación mejorada de petróleo o la ECBM |
| Almacenamiento geológico: vigilancia y verificación | 0,1-0,3 US\$/tCO ₂ inyectado | Esto abarca la fase previa a la inyección, la inyección y la vigilancia posterior a la inyección, y depende de las prescripciones reglamentarias |
| Almacenamiento oceánico | 5-30 US\$/tCO ₂ inyectado (neto) | Con inclusión del transporte a 100-500 km de la costa; quedan excluidas la vigilancia y la verificación |
| Carbonatación mineral | 50-100 US\$/tCO ₂ mineralizado (neto) | Escala correspondiente al mejor caso estudiado. Incluye el uso de energía adicional para la carbonatación |

Fuente: METZ, Bert, et al. Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.42. ISBN: 92-9169-319-7.

Nota: Los valores se encuentran en dólares de los EE.UU por tonelada de CO₂ evitada

³⁰³ *Ibíd.*, p. 42.

Tabla 7. Escala de costos totales correspondientes a la captura, transporte y almacenamiento geológico

| Parámetros del rendimiento y los costos de la central eléctrica | Central de carbón pulverizado | Central eléctrica de ciclo combinado de gas natural | Central eléctrica de ciclo combinado de gasificación de carbón integrada |
|--|-------------------------------|---|--|
| Central de referencia sin CAC | | | |
| Costo de la electricidad (USD/kWh) | 0.043-0.052 | 0.031-0.050 | 0.041-0.061 |
| Central de referencia con CAC | | | |
| % aumento de la necesidad de combustible | 24-40 | 11-22 | 14-25 |
| CO₂ capturado (kg/kWh) | 0.82-0.97 | 0.36-0.41 | 0.67-0.94 |
| CO₂ evitado (kg/kWh) | 0.62-0.70 | 0.30-0.32 | 0.59-0.73 |
| % CO₂ evitado | 81-88 | 83-88 | 81-91 |
| Central eléctrica con CAC y almacenamiento geológico | | | |
| Costo de la electricidad (USD/kWh) | 0.063-0.099 | 0.043-0.077 | 0.055-0.091 |
| Costo de la CAC (USD/kWh) | 0.019-0.047 | 0.012-0.029 | 0.010-0.032 |
| % aumento del costo de la electricidad | 43-91 | 37-85 | 21-78 |
| Costo de la mitigación (USD/tCO₂ evitado) | 30-71 | 38-91 | 14-53 |
| Central eléctrica con CAC y almacenamiento para recuperación mejorada de petróleo | | | |
| Costo de la electricidad (USD/kWh) | 0.049-0.081 | 0.037-0.07 | 0.04-0.075 |
| Costo de la CAC (USD/kWh) | 0.005-0.029 | 0.006-0.002 | (-0.005)-0.019 |
| % aumento del costo de la electricidad | 12-57 | 19-63 | (-10)-46 |
| Costo de la mitigación (USD/tCO₂ evitado) | 9-44 | 19-68 | (-7)-31 |

Fuente: METZ, Bert, et al. Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.43. ISBN: 92-9169-319-7.

Nota: Los costos son sobre la base de la tecnología existente para nuevas centrales eléctricas que utilizan carbón bituminoso o gas natural

Como se observa en la tabla 7, los costos pueden reducirse al utilizar recuperación de petróleo mejorada, debido a que los ingresos generados por ella, compensan en parte los costos de la tecnología; además es evidente según la IEA³⁰⁴ que, también en las plantas que utilizan carbón, la reducción de costo es mayor, puesto que captan mayor cantidad de CO₂.

¹bíd., p. 42.

El tipo de captura post-combustión es la de menor coste debido a que no se requiere mayor modificación en la infraestructura; según Cámara³⁰⁵, basándose en el informe Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics publicado en el 2008, menciona que para una planta ultra-supercrítica de 700°C con captura en post-combustión de 900MW y con eficiencia del 40%, una tasa de captura del 90%, se estima que el coste por tonelada de CO₂ evitado es de 31-41USD, valores que se encuentran en el rango de la tabla 7.

Para el tipo de captura pre-combustión, como lo dice Cámara³⁰⁶, el costo de la CAC oscila entre 0.01-0.03USD/kWh en relación con una planta sin CAC; para ésta el costo de inversión depende del combustible considerado y el precio de la electricidad es similar al de otras tecnologías por su eficiencia y por el uso de combustibles fósiles más económicos y sostenibles; y el de captura oxi-combustión, el mayor costo es el de conseguir el oxígeno puro, se espera de este que el rendimiento de la primera generación sea alrededor del 35%.

Según visto en lo anterior y acorde a Naucleer³⁰⁷, hay un grado de incertidumbre en la estimación de costos de la CAC, debido a variaciones en los factores técnicos relacionados con el diseño y operación de la planta, la escala, la aplicación y en cómo se desarrollará a futuro la tecnología. En principio, el costo de la captura y almacenamiento de carbono incluye las inversiones iniciales, los gastos operacionales, electricidad, combustible; el costo contiene todos los componentes de la cadena de valor, desde su captura hasta su almacenamiento geológico.

Los principales factores que afectan el costo de la captura de CO₂ según Metz³⁰⁸ son:

- Definición de la tecnología de interés: los costos varían según la elección del sistema de energía o proceso industrial que genera las emisiones.
- Definición del límite del sistema: como se está hablando solamente de la fase de captura; ese es el límite. Sin embargo, la compresión del gas ocurre en las instalaciones, por lo tanto es incluido en esta fase.

³⁰⁵ CÁMARA, Ángel, *et al.* Captura y almacenamiento de CO₂. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas. 2011. 117p.

³⁰⁶ *Ibid.*, p. 110.

³⁰⁷ NAUCLÉR, Tomas; CAMPBELL, Warren y RUJIS, Jurriaan. Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics. McKinsey & Company. 2008. 53p.

³⁰⁸ METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Op. Cit., p. 146-147.

- Definición del marco tecnológico y madurez: es algo difícil cuando se trata de tecnologías avanzadas que se encuentran en desarrollo y no son actualmente comerciales. No obstante, se realizan las estimaciones basados en una planta X que se construirá cuando la tecnología este madura.
- Diferentes medidas de costos y suposiciones: en la literatura se encuentran diferentes medidas utilizadas para la caracterización de costos e incluso algunas veces se encuentran en diferentes unidades lo que puede generar malentendidos.

Para la fase de transporte, depende del tipo de transporte; si va a realizarse por tubería o por buque. Cuando se trata de tubería, los costos se dividen en 3:

1. Costos de construcción: material, equipo, gastos de instalación.
2. Costos de operación y mantenimiento, junto con posibles costos de energía.
3. Otros costos: diseño, administración de proyectos, honorarios, seguros, derechos de paso, entre otros.

Donde los costos del material dependen de la longitud, diámetro de la tubería, de la cantidad y calidad de CO₂ a transportar. Las inversiones son mayores cuando se requieren de estaciones compresoras que compensan a pérdida de presión a lo largo de la tubería; estas estaciones pueden evitarse utilizando un diámetro mayor y reduciendo la velocidad de flujo. El terreno también es importante, puesto a que si se trata de un área montañosa o con obstáculos como ríos, autopistas o urbanizaciones, el costo incrementa. Como lo hace saber Metz³⁰⁹, hay que tener en cuenta que es más económico recolectar varias fuentes de CO₂ a transportar que hacerlo en cantidades pequeñas por separado; razón por la cual, los proyectos iniciales se enfrentarán a costes relativamente altos.

En cuanto al sistema de transporte marítimo comprende varios elementos además de la inversión para los buques, también se requieren instalaciones de carga, descarga, almacenamiento intermedio y unidades de licuefacción; asimismo, costos adicionales para la operación, lo que comprende mano de obra, combustible del buque, electricidad, tarifas portuarias y mantenimiento.

En la actualidad como lo indica Metz³¹⁰, no se conoce el coste de esto porque no se ha aplicado ningún sistema a escala; sin embargo, puede decirse que el diseño de un buque para transportar CO₂ cuesta alrededor de 30-50% más que un buque semi-refrigerado de GLP de tamaño similar, es decir, para una embarcación de

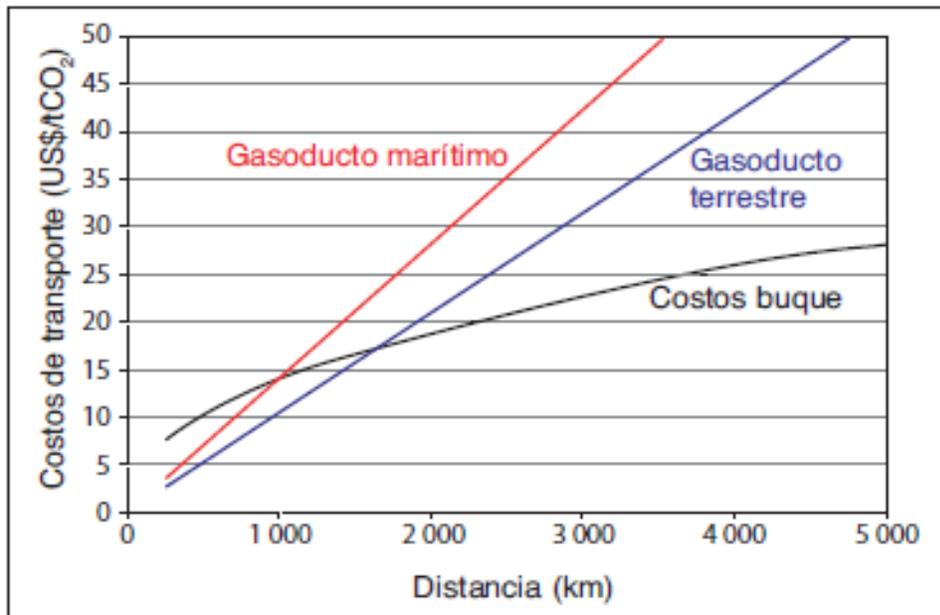
³⁰⁹ *Ibíd.*, p. 190.

³¹⁰ *Ibíd.*, p. 190.

10kt puede costar 34 millones de USD, para uno de 30kt, 34 millones de USD y para 50kt, 85 millones de USD, costos que cubren los cargos de capital, dotación y mantenimiento; la petrolera Statoil estima que el costo de la instalación de licuefacción puede ser de 35-50 millones de USD para una capacidad de 1Mt/año.

El transporte marítimo se vuelve competitivo cuando se largas distancias se trata, en la figura 60 se muestran los costos de transporte por tonelada de dióxido de carbono por los gasoductos terrestres, marítimos y por buque. Según dice Metz³¹¹, los 1.000km se pueden decir que es la distancia de equilibrio, donde las líneas se cruzan; para distancias mayores, los buques se vuelven más atractivos económicamente y no es solamente por los kilómetros recorridos sino por cuestiones como las terminales de carga, cruces de gasoductos, estabilidad de los fondos marinos, costo del combustible, de producción, de operación y seguridad.

Figura 60. Comparación de costos de transporte (USD/TonCO₂) por distancia (km) y tipo de transporte



Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.30. ISBN: 92-9169-319-7.

Para la última fase, el almacenamiento también se tiene en cuenta diferentes factores; primero que todo el tipo de almacenamiento. Si se habla del geológico, los mayores costes son para los pozos de perforación, infraestructura y administración de proyectos; la mano de obra también es tomada en cuenta junto con el mantenimiento, el combustible, los estudios de factibilidad, geológicos,

³¹¹ *Ibid.*, p. 192.

geofísicos y de ingeniería necesarios para la selección del sitio. Además de ello, Metz³¹² confirma que los costos pueden variar según la extensión de datos preexistentes, la complejidad geológica y los riesgos de fuga. Algo que agrega costo pero que es necesario es el monitoreo del almacenamiento y a futuro pueden haber otros costos adicionales para remediación y pasivos.

El coste del almacenamiento depende de su sitio, de su ubicación, profundidad, características del yacimiento, lo que produce un alto grado de variabilidad. En el mar suelen ser más altos los precios por la necesidad de plataformas o instalaciones submarinas; son específicamente 3 componentes los que precisan el costo del almacenamiento oceánico; el almacenamiento de tanques en tierra en espera del embarque, el envío y el buque de inyección con la tubería y la boquilla. Acorde a Metz³¹³, al igual que el almacenamiento geológico, el oceánico requiere de vigilancia y verificación, para estos se requieren una variedad de sensores en el mar.

Aunque no se conocen los precios exactos de la captura y almacenamiento del CO₂, Naucner³¹⁴ tiene un estimado realizado en el 2011; aun así se espera que con el pasar del tiempo, se reduzcan significativamente. Como se mencionó anteriormente, los precios de la tonelada de CO₂ varían, y con este el de la tecnología, pero no depende solamente de la tonelada, sino también de la energía eléctrica y los procesos con los cuales se desarrollan las actividades para efectuar la captura, transporte y almacenamiento.

Se calcula según Naucner³¹⁵, que los primeros proyectos a escala comercial se construirán después del año 2020 y costarán entre 35-50€/TonCO₂ reducida; los proyectos iniciales a menor escala se centran en probar la tecnología éstos tienen lugar entre el 2012-2015 y cuestan entre 60-90€/TonCO₂ reducida; en el futuro, alrededor del año 2030, el costo dependerá del estado de desarrollo de la tecnología, las economías a escala, la disponibilidad de lugares para el almacenamiento, por lo que se calcula que el costo será entre 30-45€/TonCO₂ reducida. En el caso que haya un despliegue global con los proyectos para el 2030, el precio podría reducirse 5€/TonCO₂, además de ello, se puede esperar que disminuya más por el avance de la tecnología; lo anterior se muestra en la figura 61, donde se evidencian los costes más altos y bajos para cada fase comercial nombrada anteriormente.

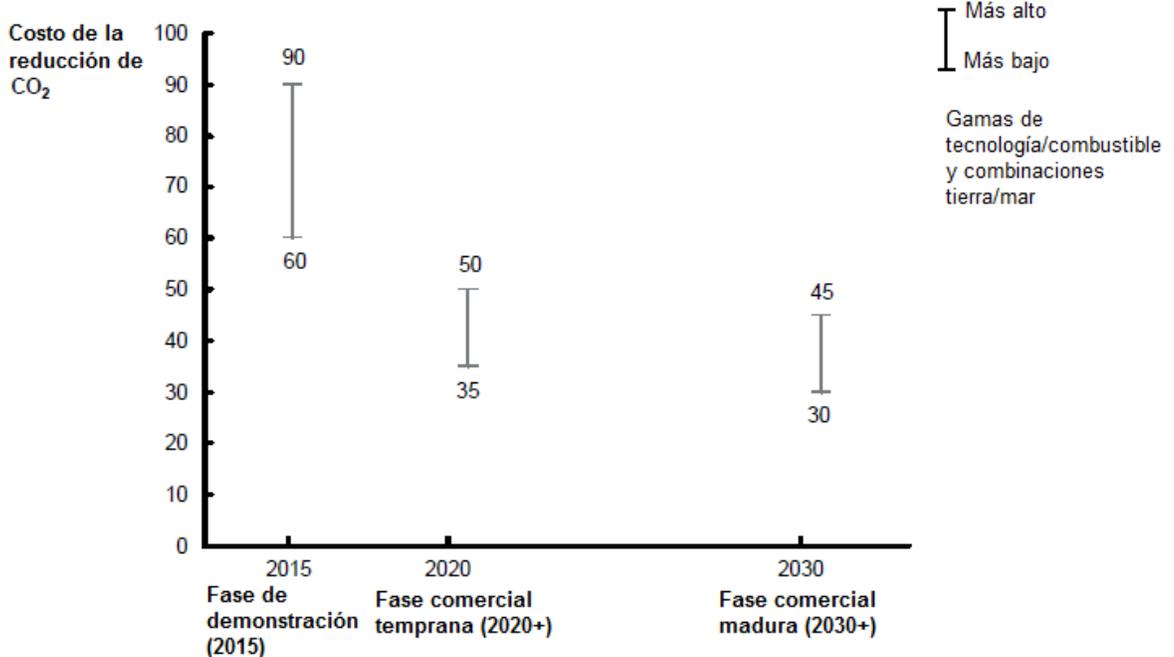
³¹² *Ibíd.*, p. 259.

³¹³ *Ibíd.*, p. 311.

³¹⁴ NAUCLÉR, Tomas; CAMPBELL, Warren y RUJIS, Jurriaan. Op. Cit., p. 14.

³¹⁵ *Ibíd.*, p. 16.

Figura 61. Coste total de CAC para diferentes fases



Fuente: NAUCLÉR, Tomas; CAMPBELL, Warren y RUJIS, Jurriaan. Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics. McKinsey & Company. 2008. p. 17.

En la figura anterior, se observa que para la fase comercial temprana (2020+), el coste total de CAC es alrededor de 35-50€/TonCO₂ reducida, donde 30€/TonCO₂ son para la fase de captura, aproximadamente 5€/TonCO₂ reducida para el transporte, (4 si es en tierra y 6 si es mar adentro) y alrededor de 10 para el almacenamiento geológico. La fase de captura es la de mayor coste, lo afirma Naucler³¹⁶, debido a la adición de equipos necesarios para el procedimiento, por la energía necesaria para realizarlo, el combustible que sería entre 2-6€/TonCO₂ reducida y el coste operativo de 5-7€/TonCO₂ reducida, estos dos últimos valores son variables.

En la fase comercial madura (2030+), el posible desarrollo va más allá de la primera fase comercial; según la figura 60 el coste total está entre 30-45€/TonCO₂ reducida, aun así se prevé que al ser maduro, los proyectos anteriores causen una disminución en el coste por el desarrollo anterior, aproximadamente de 5-10€/TonCO₂ reducida menos. Todo depende según Naucler³¹⁷, de estos años y por el progreso que vaya teniendo la tecnología.

Existen 4 factores principales que pueden aumentar el costo en un reequipamiento, es decir, el acoplar a una planta ya existente la CAC según indica

³¹⁶ *Ibíd.*, p. 18.

³¹⁷ *Ibíd.*, p. 23-24.

Naucler³¹⁸; el primero es el capex, que es el gasto de adquirir o mejorar los activos con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia; el segundo, es la vida útil de la instalación, si la fuente de emisión ya está en funcionamiento, por ejemplo, el sistema de CAC puede durar 40 años y si se trata de una central eléctrica de 20 años, ya tendrá la vida reducida; lo que reduce la eficiencia; el tercero, hay una penalización de eficiencia lo que se traduce en un mayor costo de combustible; y por último, el llamado costo de oportunidad, dado a que la planta se tiene que poner fuera de servicio mientras se instala el equipo de captura. Sin embargo, la adaptación de esta tecnología es una opción atractiva debido a una que se requiere menor inversión y asimismo el tiempo de construcción será reducido.

Según informa la Comisión Europea³¹⁹, en la actualidad las centrales energéticas con CAC no pueden producir electricidad a un coste rentable, lo anterior se debe a que el precio que se paga por emitir CO₂ es menor al de la tecnología; como se muestra en la figura 62, los proyectos que se den en el óvalo rojo, serán los primeros operativos y asumirán un déficit financiero de entre 25-55€/TonCO₂. Se estima que para el año 2020, se reducirá a la mitad el coste si se produce la tecnología de forma continua; el óvalo azul representa la viabilidad económica de los proyectos con elevados precios de CO₂.

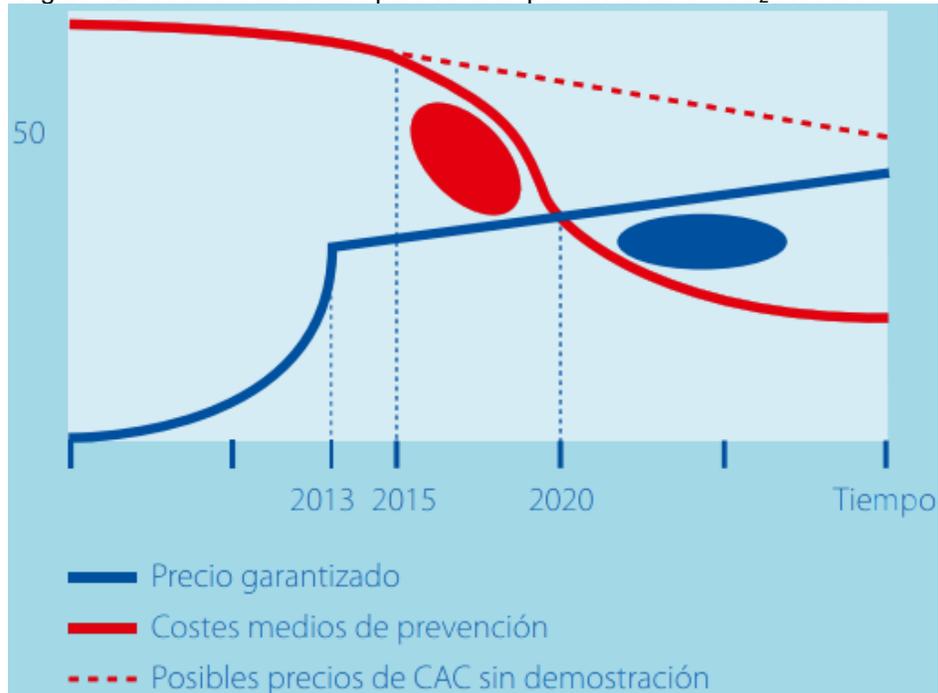
De acuerdo al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA)³²⁰, los precios de la tonelada de dióxido de carbono fluctúan continuamente y con este también el valor de los CER (Certificados de Emisiones Reducidas) éstos son una clase de bono de carbono los cuales tienen el fin de que las empresas de países industrializados “paguen” por contaminar; se miden por tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera y funcionan en el mercado del carbono, el cual consiste en gobiernos, empresas o individuos que pueden vender o adquirir reducciones de gases de efecto invernadero.

³¹⁸ *Ibíd.*, p. 29-30.

³¹⁹ COMISIÓN EUROPEA. Captura y almacenamiento de CO₂. 2009. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://bookshop.europa.eu/es/captura-y-almacenamiento-de-co2-pbKO7809957/>

³²⁰ SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL (SINIA). ¿Qué es el mercado del carbono?. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-48293.html>

Figura 62. Costes adicionales para la CAC por tonelada de CO₂ en euros



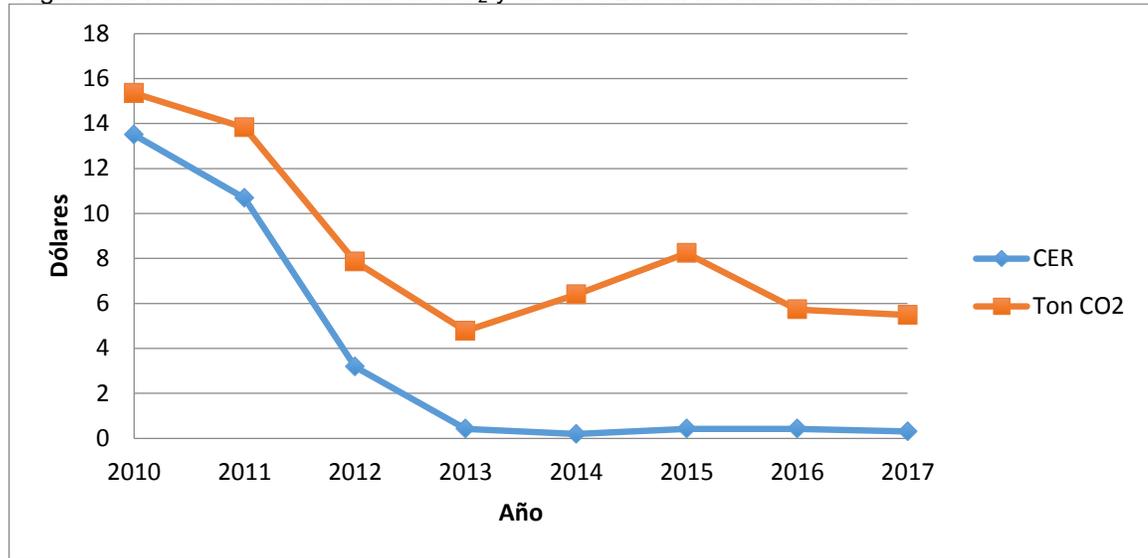
Fuente: COMISIÓN EUROPEA. Captura y almacenamiento de CO₂. 2009. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://bookshop.europa.eu/es/captura-y-almacenamiento-de-co2-pbKO7809957/>

Como informa el Sistema Europeo de Negociación de CO₂ el precio de los CER colapsó, éstos en el 2010 estaban en 13.50USD, en el 2011 de 10.68USD, en el 2012 de 3.18USD, en el 2013 de 0.42USD, en el 2014 de 0.19USD, en el 2015 de 0.42USD, en el 2016 también de 0.42USD y lo que va del 2017 de enero a abril es de 0.30USD³²¹; conjuntamente, el precio de la tonelada de dióxido de carbono ha fluctuado en el mercado como se muestra a continuación en la figura 63, de rojo se encuentra el precio en euros de la tonelada de CO₂ y en azul los de los CER. A pesar de la desvalorización de los certificados, el mercado de carbono es un buen estímulo para que las industrias le apunten a la reducción de emisiones; según informa Portafolio, en el 2008³²² la tonelada de carbono llegó a costar hasta 23 euros, mientras que en el 2013 bajó ese valor, debido en gran medida a la falta de demanda; otro factor involucrado es el precio del barril de petróleo que ha estado bajo en los últimos años.

³²¹ SISTEMA EUROPEO DE NEGOCIACIÓN DE CO₂ (SENDECO₂). Precios CO₂. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

³²² PORTAFOLIO. Mercado de carbono: débil, pero es un buen incentivo. En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/mercado-carbono-debil-buen-incentivo-54092>

Figura 63. Precio de la tonelada de CO₂ y de los CER en los años 2010-2017



Nota: Elaboración propia. Información fue tomada de SISTEMA EUROPEO DE NEGOCIACIÓN DE CO₂ (SENDECO₂). Precios CO₂. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

Según empresas, científicos, académicos y organizaciones no gubernamentales, pertenecientes a Zero Emission Platform³²³ (ZEP), por medio de un estudio concluyen que para después del 2020, la Captura y Almacenamiento de Carbono tendrá un costo competitivo respecto a otras tecnologías de baja emisión de carbono, incluida la eólica, solar y nuclear. Como se evidencio en este capítulo, todo es variante y depende de diferentes factores tales como el desarrollo en la continua investigación, en las tecnologías, los proyectos, el precio de la tonelada de dióxido de carbono y los incentivos a las compañías para implementar tal tecnología que es una de las herramientas para la disminución de CO₂ en la atmósfera y por ende, al cambio climático.

³²³ ZERO EMISSIONS PLATFORM (ZEP). The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. Post-demonstration CCS in the EU. 2011. 50p.

8. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Es necesario disminuir los riesgos del cambio climático y la mitigación es uno de los enfoques para ello; un elemento para lograrlo es mediante la reducción de las emisiones de CO₂, debido a que una meta es la de estabilizar y/o reducir la cantidad de carbono en la atmósfera a nivel global, ya sea minimizando la tasa de emisión o incrementando la tasa de absorción; la última hace referencia a la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC). Según un informe del IPCC³²⁴, si no se realizan nuevos esfuerzos en la mitigación aparte de los que se hacen actualmente, a finales del siglo XXI el calentamiento provocará un riesgo alto a impactos graves, generalizados e irreversibles a nivel mundial. Los sectores industriales son grandes emisores de gases de efecto invernadero causantes de ese calentamiento y por eso para que contribuyan a la mitigación del calentamiento global, considerar a la CAC como herramienta es una buena opción; además, en países desarrollados se ha hecho progreso en la investigación y desarrollo de proyectos de CAC.

8.1 HERRAMIENTA PARA LA MITIGACIÓN

Existe gran variedad de opciones para la mitigación del cambio climático según el IPCC³²⁵, las cuales reducen la intensidad de las emisiones de GEI, mejoran el comportamiento, la eficiencia de la producción y los recursos; pero se dice que la CAC puede ser la segunda medida más eficaz para reducir las emisiones de CO₂ en Europa, detrás de la eficiencia energética y delante de las energías renovables. Además, la Comisión Europea³²⁶ estima que en el año 2030, se podría evitar un 10% de las emisiones de la UE gracias a esta tecnología de CAC. Asimismo, hay modelos que indican que será competitiva respecto a otras opciones de mitigación a gran escala, como la energía nuclear y las energías renovables; una de las ventajas, es que es compatible con la mayor parte de las infraestructuras existentes.

Mediante la imposición del mercado de emisiones y de las energías renovables, no es posible alcanzar una economía “descarbonizada”; se requiere de más, según el informe Stern sobre la economía del cambio climático, “(...) ninguna tecnología o proceso único proporcionará las reducciones climáticas necesarias

³²⁴ IPCC, Op. Cit., p. 84.

³²⁵ *Ibíd.*, p. 107.

³²⁶ COMISIÓN EUROPEA. Captura y almacenamiento de CO₂. 2009. [En línea]. [21 abril de 2017] disponible en: <https://bookshop.europa.eu/es/captura-y-almacenamiento-de-co2-pbKO7809957/>

para mantener el cambio climático dentro de los límites previstos³²⁷; sin embargo, la atención se centra en la CAC, la cual puede ayudar a reducir las emisiones de centrales eléctricas y demás sectores industriales que generen GEI. Tiene la ventaja de que si se llega a desplegar a gran escala, puede conciliar el uso de combustibles fósiles a mediano y largo plazo; ya que según Stern³²⁸, casi el 70% de la producción de energía será procedente de combustibles fósiles para el 2050; razón por la cual todos coinciden en el punto que si se trata de eficiencia energética y mitigación al cambio climático, la CAC será importante.

Dávila³²⁹ considera que la tecnología CAC pueda aportar lo que se espera en cuanto al almacenamiento geológico que es la opción más viable y para cumplir la meta de la mitigación, es necesario que como se muestra en la figura 64, para el año 2025 se estén capturando al menos 160Mt de CO₂ anuales y para el año 2050, se estén capturando 10Gt de CO₂ anuales; para lograrlo, es necesario el despliegue de la tecnología y el desarrollo de los proyectos que se tienen en evaluación.

Además, según los análisis de la Comunicación de la Comisión sobre Producción sostenible de electricidad a partir de combustibles fósiles, que a su vez es referenciado por Sanz³³⁰; la CAC podría eliminar el 90% de las emisiones de las centrales térmicas que generan electricidad y contribuir a reducir aproximadamente un 25% de las emisiones globales de la UE en relación con el año 2000.

La Unión Europea es la más comprometida con la investigación y desarrollo de la tecnología a nivel global; ya ha cambiado parte de la regulación para que la CAC tenga una mejor proyección, ha desarrollado varios proyectos. Acorde a Dávila³³¹, ay que tener en cuenta que la UE solo genera el 10% de las emisiones de GEI mundiales; así que más países desarrollados que son los que cuentan con el capital financiero y las emisiones contaminantes, si quieren contribuir a mitigar el cambio climático, deben seguir su ejemplo para así favorecer al planeta y lograr que en un futuro la tecnología se vuelva más asequible y los países en vía de desarrollo que tengan grandes emisiones de gases, también puedan implementarla.

³²⁷ STERN, Nicholas. The economics of climate change: The stern review. Cambridge University Press; 2007. p. 222.

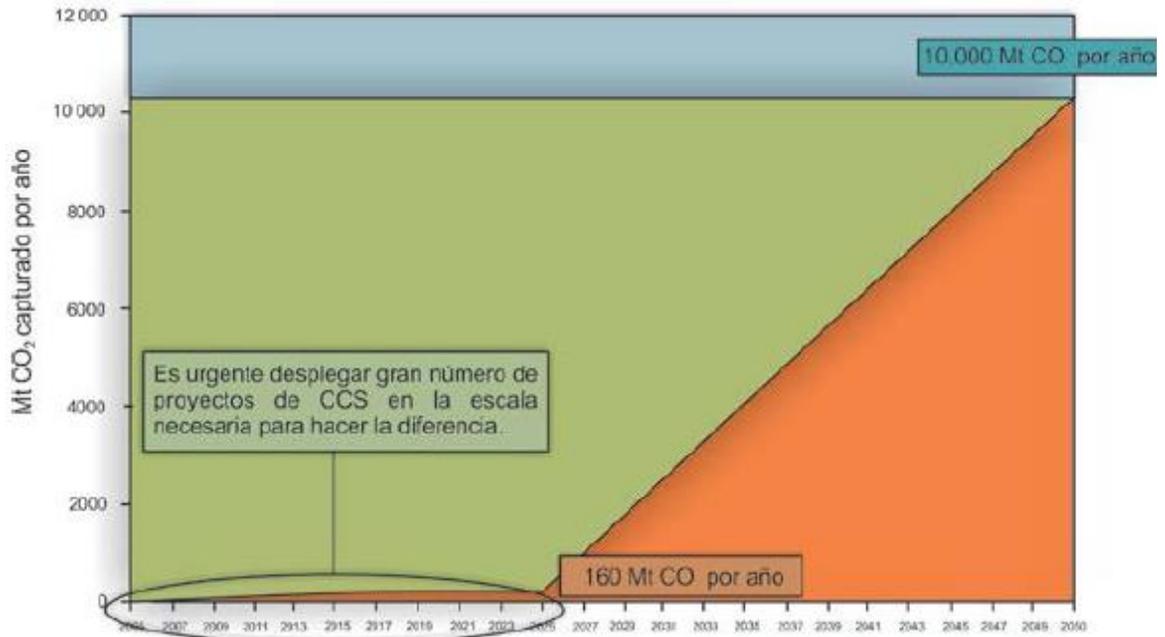
³²⁸ *Ibíd.*, p. 224.

³²⁹ DÁVILA, Moisés. Estado del almacenamiento geológico de CO₂ en México. 2012. p. 30.

³³⁰ SANZ, Íñigo. *Op. Cit.*, p.168.

³³¹ DÁVILA, Moisés. *Op. Cit.*, p. 30, 172.

Figura 64. Importancia de iniciar proyectos de CAC globalmente para cumplir con la capacidad de almacenamiento esperada y necesaria



Fuente: WITHAKER, S. Role and Status of CCS in Mitigating CO₂ Emissions. First Workshop International on CCS for Earth Sciences Students. México. 2012 citado por DÁVILA, Moisés. Estado del almacenamiento geológico de CO₂ en México. 2012. p. 30.

Algunos efectos que trae la tecnología de captura y almacenamiento de carbono en la parte económica de acuerdo al IPCC³³², es que es necesario realizarle un seguimiento a largo plazo al almacenamiento por si hay riesgo de fugas; en la parte social, genera un impacto en la salud por riesgo de fugas y aumento de las actividades en la cadena de suministro de energía y en la parte ambiental, produce un impacto en el ecosistema debido a actividades adicionales en el abastecimiento de energía y aumento del uso del agua.

Como se ha mencionado anteriormente, la vigilancia y verificación para la debida gestión de riesgos en los proyectos de almacenamiento geológico es importante y más si se encuentra en desarrollo la tecnología; cualquier contratiempo no evaluado ni monitoreado frenaría o disminuiría su progreso porque, por ejemplo, Greenpeace³³³ que es una organización mundial que trabaja para proteger el medio ambiente, considera que hay puntos críticos los cuales deben ser considerados y se nombran a continuación:

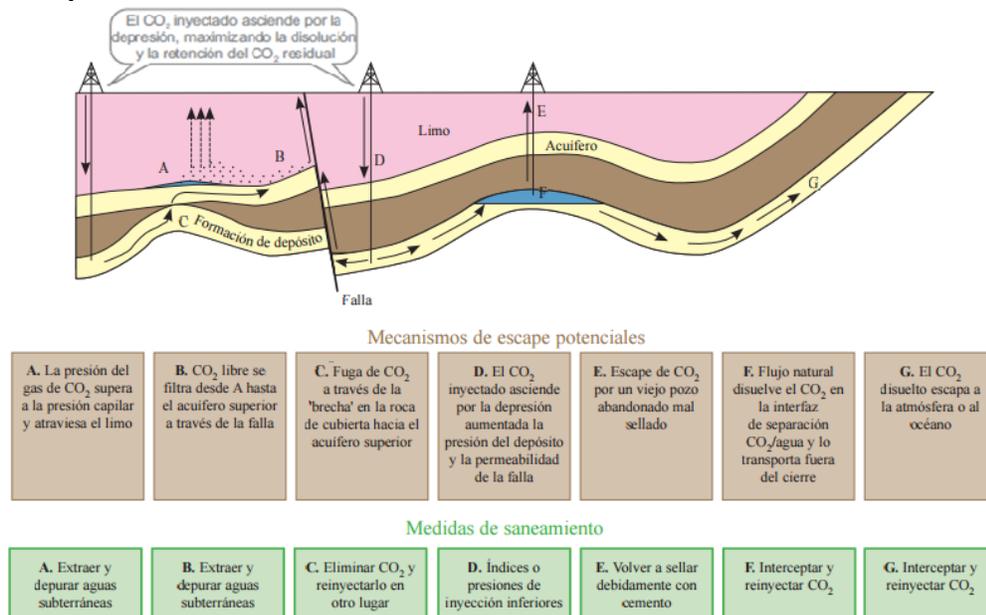
³³² IPCC, Op. Cit., p. 112.

³³³ GREENPEACE. Captura y secuestro de carbono (CCS) una inyección arriesgada. [En línea]. [22 abril de 2017] disponible en: http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/captura-y-secuestro-de-carbono-2.pdf

- El vertido directo del CO₂ en el mar debe ser excluido debido a que en el océano, puede reducir el pH causando mayor acidificación lo que es perjudicial para organismos y ecosistemas enteros.
- Los yacimientos salinos y minas de carbón acarrean problemas como riesgo a facilitar una vía de escape, también llamada fuga y la expansión del carbón debido a la inyección del dióxido de carbono puede causar fracturas en las capas de las rocas.
- Riesgos debidos al almacenamiento en los yacimientos de petróleo y gas en explotación o ya agotados dado que tienen perforaciones que deben ser selladas y cada perforación adicional puede incrementar el riesgo a escapes.

Para que un programa de CAC sea seguro y eficaz, tiene que ser eliminada cualquier posibilidad de fuga a la atmósfera o al menos tener contempladas las vías de saneamiento; por ejemplo, en la figura 65 se evidencian las posibles rutas de fugas de dióxido de carbono cuando se inyecta en formaciones salinas, así mismo se encuentran las técnicas de saneamiento que varían dependiendo la ruta identificada de fuga. De la misma forma, en palabras de la IEA³³⁴, aunque hoy en día esta tecnología pueda estar comercialmente disponible, la ausencia o aplicación incompleta de leyes y reglamentos, siguen siendo un obstáculo para el desarrollo de los proyectos.

Figura 65. Posibles rutas de fugas y técnicas de saneamiento para el CO₂ inyectado en formaciones salinas



Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.35. ISBN: 92-9169-319-7.

³³⁴ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Op. Cit., p. 337.

La captura y almacenamiento de carbono también tiene sus ventajas y beneficios, los cuales además de ser una herramienta para la mitigación del cambio climático para la mayoría de sectores industriales emisores de gases de efecto invernadero, promueve a mayor investigación y desarrollo en proyectos; incita a valorar la información existente de formaciones geológicas y a realizar las pruebas con mayor exactitud, ya que pueden ser sitios potenciales para un futuro almacenamiento; asimismo, fomenta mayor actividad para el mercado de carbono, haciendo así que los certificados de reducciones de emisiones sean más apetecidos por las industrias; además, cuando el CO₂ es utilizado con fines industriales, incrementa la eficiencia y no es factor contaminante si se llega a capturar y almacenar.

8.2 IMPORTANCIA EN SECTORES INDUSTRIALES

Actualmente, los países, las industrias se encuentran económicamente desarrolladas lo que causa que la parte científica y tecnológica también lo haga. En las últimas décadas se ha discutido sobre el calentamiento global, cambio climático y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono, del cual es necesario reducir su emisión y junto con el avance de la ciencia, ahora se puede capturar para luego ser almacenado.

Así como la Unión Europea que es la que lleva la delantera en investigación y desarrollo de proyectos de captura y almacenamiento de carbono, tiene una regulación que beneficia a las industrias que implementen la tecnología; otros países también lo tienen; por ejemplo, en Colombia el Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible³³⁵, trabaja pensando que el desarrollo sostenible es una opción para lograr una mayor rentabilidad, mejor calidad de vida y utilización racional de los recursos naturales; asimismo acompaña a empresas para que desarrollen y pongan en práctica proyectos que logren un equilibrio entre los objetivos económicos, sociales y ambientales.

De acuerdo a la WBCSD³³⁶, modelos energéticos y económicos indican que no es probable que los sistemas de captura y almacenamiento de carbono contribuyan significativamente a la mitigación del cambio climático a menos que se impongan límites respecto a las emisiones, lo que conllevaría a que sean utilizados en gran escala en un futuro cercano. Se dice que la CAC puede contribuir con una sexta parte de todas las reducciones de las emisiones necesarias de CO₂ para el 2050, es decir, los proyectos de CAC captaran casi la mitad de este CO₂ de fuentes industriales y el resto en generación de electricidad. En pocas palabras, la CAC es una tecnología pura de mitigación de CO₂ porque la única razón de desarrollarla e implementarla es para reducir las emisiones.

Es de gran importancia la implementación de la captura y almacenamiento de carbono como alternativa directa a la reducción de emisiones en grandes focos de

³³⁵ CONSEJO EMPRESARIAL COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE (CECODES). Quienes somos. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: <http://www.cecodes.org.co/site/quienes-somos/>

³³⁶ WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Business Solutions to the United Nations Climate Summit. Action 2020. Abu Dhabi: 2014. p. 8.

combustión como se evidencia en la tabla 8; en ella se encuentra el número de fuentes de dióxido de carbono y la cantidad de emisiones al año, evidenciándose que la mayoría provienen de la quema de combustibles fósiles, en especial la producción de energía, producción de cemento y refinerías; que son los sectores industriales estudiados en el presente documento.

Tabla 8. Perfil por procesos o actividades industriales de las grandes fuentes estacionarias de CO₂ de todo el mundo

| | Proceso | Número de fuentes | Emisiones (MtCO ₂ /año) |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Combustibles fósiles | Energía | 4,942 | 10,539 |
| | Producción de cemento | 1,175 | 932 |
| | Refinerías | 638 | 798 |
| | Industria siderúrgica | 269 | 646 |
| | Industria petroquímica | 470 | 379 |
| | Refinamiento de petróleo y gas | No disponible | 50 |
| | Otras fuentes | 90 | 33 |
| Biomasa | Bio-etanol y bioenergía | 303 | 91 |
| TOTAL | | 7,887 | 13,468 |

Fuente: METZ, Bert, *et al.* Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. PNUMA, 2005. p.2. ISBN: 92-9169-319-7.

Nota: Cada proceso o actividad tiene las emisiones de más de 0.1 millones de toneladas de CO₂ al año

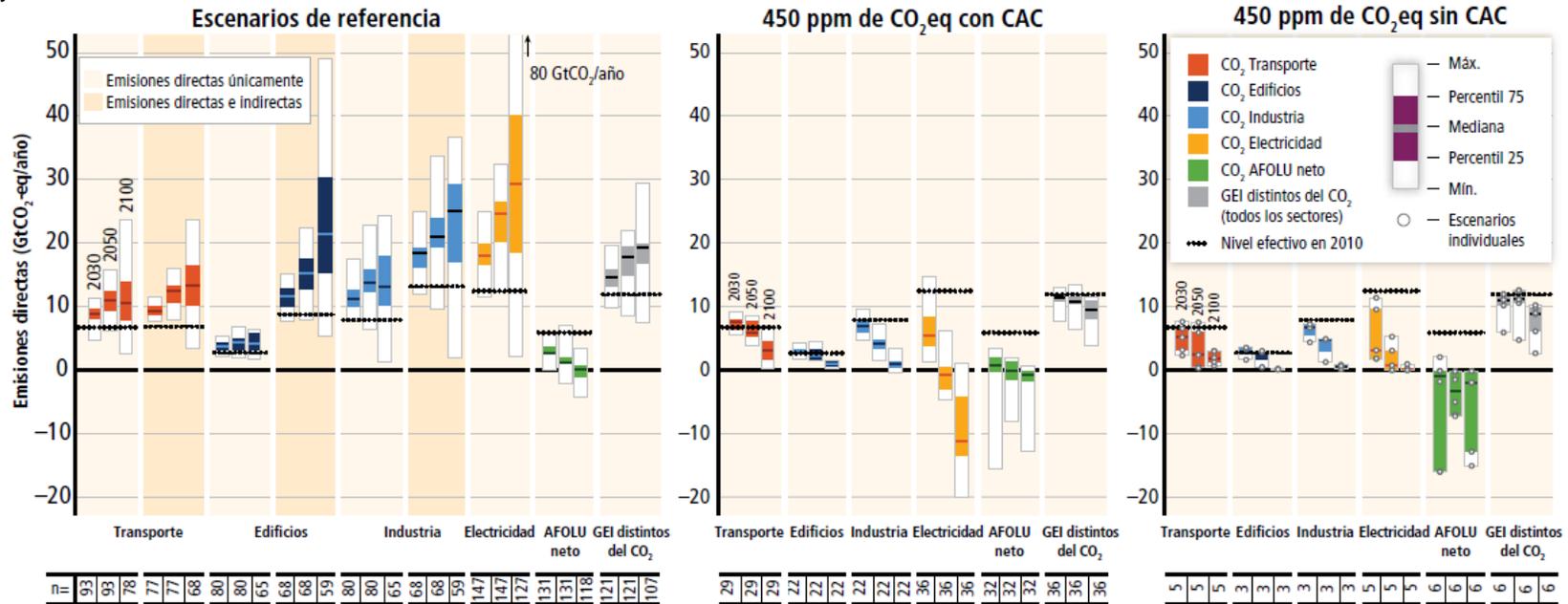
En el sector de construcción, la producción de cemento como se evidencia en la tabla 8, es un gran emisor de dióxido de carbono anualmente con gran número de fuentes; es por eso que, bajo el liderazgo de la Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento (CSI) del WBCSD³³⁷, identificó que la CAC es una de las cuatro palancas para reducir las emisiones. Las emisiones de producción de carbono representan alrededor del 5% de las emisiones globales de CO₂ en la industria cementera y la reducción en su demanda o sustitución no es una opción viable debido a que el cemento es un material clave para construir la infraestructura de la sociedad.

Actualmente, se realizan varios proyectos de investigación anuales dirigidos por la industria. No solamente en la producción se generan emisiones de dióxido de carbono sino en otras también; según la IEA³³⁸, la CAC puede utilizarse en centrales eléctricas de carbón y gas, instalaciones de procesamiento de gas natural, centrales eléctricas y otras fuentes industriales, tales como plantas de gas, refinerías, acerías; las anteriormente nombradas, más la producción de cemento, significan el 57% de las emisiones globales anuales de CO₂, por lo tanto, si se implementa la tecnología pueden hacerse reducciones de gases significantes así como se ve en la figura 66 y simultáneamente, ayudan a mitigar el cambio climático.

³³⁷ *Ibíd.*, p. 9.

³³⁸ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Op. Cit., p. 338.

Figura 66. Emisiones de CO₂ y de GEI distintos del CO₂ directas de los sectores en los escenarios de referencia y de mitigación con y sin CAC

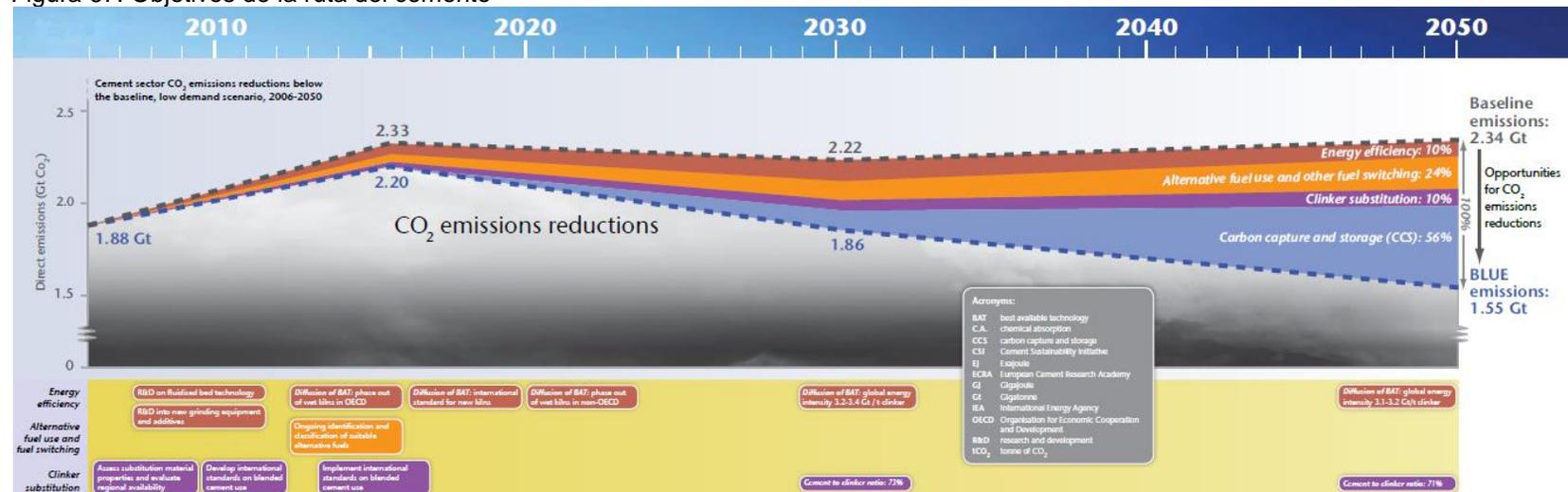


Fuente: GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. p.108.

En la figura 66, se muestran las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero distintos al CO₂ por sector en los escenarios de referencia y en los escenarios de mitigación con y sin CAC. Los escenarios de mitigación muestran solo las emisiones directas, es decir las de color amarillo claro. Por la utilización de bioenergía, que es por medio de la transformación química de la biomasa, con CAC (BECCS); las emisiones del sector eléctrico son negativas.

Como se observa en la figura 67 y de acuerdo a la IEA³³⁹, para el año 2050 se tiene una meta de reducir las emisiones a 1.55Gt anuales en la industria cementera por medio de 4 opciones las cuales aplican para cualquier sector industrial; la primera es la eficiencia energética y eléctrica, con despliegue en tecnología y modernización de equipos cuando sean económicamente viables; la segunda, con combustibles alternativos, que contengan menos carbono y con biomasa; el tercero, la sustitución de *Clinker*, por otros materiales de bajo contenido de carbono con propiedades cementosas y por último, la captura y almacenamiento de CO₂; cada una disminuye un 10%, 24%, 10% y 56% las emisiones de dióxido de carbono respectivamente.

Figura 67. Objetivos de la ruta del cemento



Fuente: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Technology Roadmap: Cement. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: http://www.wbcscement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA_Cement%20Roadmap_centre_spread_actual_size.pdf

³³⁹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Technology Roadmap: Cement, 2009. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-cement.html>

Así como en el sector de construcción en la industria cementera, la captura y almacenamiento de carbono (CAC) es una opción de mitigación la cual trae beneficios; para el sector energético también lo es. Se prevé que el precio del carbono incremente con el pasar de los años lo que hace más viable la investigación y el desarrollo de proyectos de CAC³⁴⁰. Asimismo, los bonos de carbono, comercio de emisiones, impuestos sobre el carbono, las certificaciones de reducción de emisiones (CER) y demás, se verán más atractivos para los mercados e industrias para que implementen los mecanismos necesarios para reducir las emisiones de GEI y al mismo tiempo de obtener eficiencia energética, beneficio económico, también se estará contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Según el WBCSD³⁴¹, la CAC es una tecnología importante para la reducción de emisiones, por lo cual el retrasar o abandonarla, genera un aumento en la inversión requerida en la generación de electricidad en un 40% y puede promover demandas insostenibles a otras opciones de mitigación; por lo tanto la IEA declara lo siguiente:

La captura y almacenamiento de CO₂ sigue siendo fundamental a largo plazo. La CAC se perfila hoy en el horizonte como la única tecnología que permitirá a las industrias (tales como la del acero y el hierro, el cemento o el procesamiento de gas natural) cumplir con los objetivos de drástica reducción de las emisiones³⁴².

Se sabe que solo con una tecnología, en este caso la captura y almacenamiento de carbono, no es suficiente para mitigar el cambio climático según las metas que se han estipulado, aunque esta ayude en gran medida y pueda ser implementada en variedad de sectores industriales brindándoles diferentes beneficios; es por ello se llega a que la solución completa es la suma de energías renovables más eficiencia energética más la captura y almacenamiento de carbono que da como resultado el sistema de energía sustentable del futuro.

³⁴⁰ WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Carbon pricing - The role of a carbon price as a climate change policy instrument, 2011. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: http://wbcsdservers.org/wbcsdpublications/cd_files/datas/business-solutions/energy_climate/pdf/CarbonPricing.pdf

³⁴¹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Op. Cit., p. 337.

³⁴² INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Francia: MSDS, 2012. p. 339. ISBN: 978-92-64-17488-7 citado por CÁMARA, Ángeles. Impacto del desarrollo de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ en el sector eléctrico. En: Revista de economía aplicada. Vol. 24, No. 72. 2016; p. 57-85. ISSN: 1133-455X.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero que por tener un tiempo de permanencia en la atmósfera alto y su gran cantidad de emisiones por parte de la industria y de las actividades cotidianas del ser humano, es considerado como uno de los primordiales en cuanto al calentamiento global desde hace décadas, también por sus diversos efectos que ha tenido en el planeta es uno de los temas de mayor investigación científica, las cuales abarcan sus causas, efectos, usos, pruebas de la variabilidad de su concentración respecto a lo largo del tiempo y su relación con fenómenos climáticos, medidas de mitigación y adaptación, entre otros. Aun así falta mayor investigación en cuanto a la adaptación al cambio climático.

En cuanto a los sumideros, se encuentra en la literatura que hay naturales y artificiales, los últimos se refieren a la tecnología creada por el hombre para complementar a la función de los sumideros naturales. Con el pasar de los años, los sumideros naturales van absorbiendo carbono hasta alcanzar un punto límite debido a que cada vez es mayor la cantidad a absorber y procesar comparada al pasado, cuando estaba en equilibrio la emisión y absorción.

El exceso de carbono se manifiesta entre otros, en el océano en donde ya se ha empezado el proceso acidificación y en algunas zonas de vegetación la tasa de absorción ha disminuido, apareciendo procesos críticos como los observados en ciertas áreas que se han transformado de sumideros a fuentes de carbono. Adicionalmente, las actividades antrópicas incontroladas como tala de árboles, quema de bosques y explotación excesiva de los recursos naturales, generan mayor cantidad de emisiones de carbono las cuales se emiten directamente a la atmósfera con consecuencias negativas.

Por lo anterior, se hace necesaria una búsqueda para aumentar el potencial de los sumideros naturales, haciéndolos ecológicamente sostenibles, económicamente viables y adaptables favoreciendo la absorción, proceso que se alcanza con acciones como: dejar que los bosques crezcan durante periodos de tiempo más largos, reduciendo o eliminando la tala indiscriminada de árboles. La investigación ha avanzado hasta proponer tecnologías como la fotosíntesis artificial y la captura y almacenamiento de carbono.

Los sectores industriales que mayor cantidad de GEI producen son el de construcción y el energético; en cuanto al sector de construcción, en la producción de cemento se emite gran cantidad de CO₂; por ejemplo, en el año 2006, el 6% del total de las emisiones de GEI antropogénicas provinieron de este proceso. Ése porcentaje ha ido incrementando con el pasar de los años y se proyecta que para el año 2050 incrementen un 260% respecto al año 1990. El sector energético también genera emisiones en sus procesos, exactamente, en el año 2010 el 35%

de las emisiones de GEI provenían de este sector donde un 80% correspondía a la generación de electricidad en termoeléctricas que utilizan carbón.

Lo anterior debido a que el consumo de energía ha crecido y tiende a crecer, se pronostica que entre el año 2010 y 2040, aumentará un 56% y la mayor participación proviene aún de los combustibles fósiles. El sector energético ha implementado la tecnología de captura y almacenamiento de carbono en centrales térmicas, siendo ejemplo Saskatchewan en Canadá, la cual desde el 2014, captura el 90% del dióxido de carbono de las chimeneas

Para el año 2050 se prevé un mayor desarrollo en proyectos con captura y almacenamiento de carbono, donde ésta puede alcanzar el 60% de secuestro de carbono que se emite en la producción de cemento con sólo 3.000 plantas en todo el mundo; de la misma manera, se pronostica que casi el 70% de la producción de energía será procedente de combustibles fósiles para el 2050, por lo tanto en cuanto a su aplicación en centrales eléctricas, para una planta ultra-supercrítica, con eficiencia del 40%, se estima una captura del 90%, lo que se traduce en la reducción de aproximadamente el 25% de las emisiones globales de la Unión Europea. Para lo anterior, es necesario que para el año 2025 se estén capturando al menos 160Mt de CO₂ anuales y para el año 2050, se estén capturando 10Gt de CO₂ anuales; para esto , el despliegue de la tecnología y el desarrollo de los proyectos que se tienen en evaluación son necesarios.

En la actualidad, las centrales eléctricas con CAC no producen electricidad a un costo rentable, debido a que el precio que se paga por emitir CO₂ es menor al de la tecnología; se prevé que los proyectos que se den antes del 2020, serán los que asumirán un déficit financiero de entre 25-55€/TonCO₂; por lo tanto, se estima que para después del año 2020, habrá viabilidad económica para los proyectos con elevados precios de CO₂. Lo anterior se pronostica debido a la drástica reducción ocurrida en el año 2011 en el precio de los CER, hasta la actualidad; en el 2010 el precio era de 13.50 USD y en lo corrido del 2017 está en 0.30USD.

A pesar de la pérdida de valor de los certificados, el mercado de carbono es un buen estímulo para que las industrias inviertan en la reducción de emisiones; por ejemplo, en el 2008 la tonelada de carbono llegó a costar hasta 23 euros y en esa época la viabilidad de proyectos CAC era alta, por lo tanto, se espera que estos vuelvan a incrementarse para así poder desarrollar la CAC a gran escala.

La Unión Europea es la más comprometida con la investigación y desarrollo de la tecnología a nivel global; por lo tanto ha cambiado parte de su regulación para que la CAC tenga una mejor proyección. Sin embargo, la UE genera solamente el 10% de las emisiones de GEI mundiales; por lo tanto, otros países desarrollados que son los que cuentan con el capital financiero y con las emisiones de gases contaminantes deben seguir su ejemplo para así causar un gran avance en favorecer al planeta y lograr que en un futuro la tecnología se vuelva más

accesible financieramente para los países en vía de desarrollo que también contribuyan en gran medida con emisiones de GEI.

Hay algunos factores por los cuales la CAC aun no es una tecnología comercial a gran escala; por la madurez tecnológica, los costos, el potencial global, la difusión, los aspectos normativos, la transferencia de la tecnología a los países en desarrollo, las cuestiones ambientales y la percepción pública. Actualmente altos los costos frenan a las industrias en la toma de decisión que opte por implementar la tecnología, es por ello que se requiere de mayores incentivos tanto monetarios como legislativos para impulsar la utilización de la tecnología CAC; sin embargo, una vez que se continúe con la investigación y desarrollo de la misma, la tecnología irá desplegándose mundialmente, empezando por los países desarrollados seguidos por los países en vía de desarrollo.

De igual modo, modelos indican que no es probable que los sistemas de CAC sean desplegados a gran escala mientras no exista una política explícita que limite las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera; al desarrollarse proyectos de CAC, impulsará a los impuestos de carbono, al mercado del carbono, las CER y como pronostican unos estudios, para después del 2020 la Captura y Almacenamiento de Carbono tendrá un costo competitivo respecto a otras tecnologías de baja emisión de carbono, incluida la eólica, solar y nuclear.

La implementación de la tecnología CAC junto con otras formas de eficiencia energética y energías renovables, son una vía para garantizar resultados en los esfuerzos adelantados para lograr mitigar los efectos del cambio climático y alcanzar las metas que buscan mantener la temperatura por debajo de los 2°C en el año 2020.

10. CONCLUSIONES

- La captura y almacenamiento de carbono (CAC) es una tecnología que contribuye en gran medida a mitigar los efectos del calentamiento global en comparación con las energías renovables debido a que separa, captura, transporta y almacena el dióxido de carbono proveniente de procesos industriales. Su uso en sectores industriales como el de construcción y el energético en los que se emiten gran cantidad de gases de efecto invernadero, puede marcar la diferencia por su contribución a la meta de un futuro sostenible.
- El planeta Tierra tiene sumideros de carbono naturales, los cuales absorben dióxido de carbono de la atmósfera, almacenándolo y procesándolo en el llamado 'Ciclo del carbono' manteniendo así las concentraciones en equilibrio; se encuentra en los océanos, en las tundras, los bosques, los pastizales, humedales, entre otros. Sin embargo ese equilibrio se ha roto debido al aumento de las emisiones GEI, incidiendo en que los sumideros no alcanzan a procesar eficientemente todo el dióxido de carbono como antes presentándose el caso que algunos se están transformando de sumideros a fuentes de carbono.
- Uno de los mayores sumideros de carbono natural es el océano, ha empezado a acidificarse, el pH ha disminuido aproximadamente un 30% y se prevé que para el año 2100 se encuentre en valores menores; lo que trae consigo consecuencias notables sobre el crecimiento y reproducción de corales y animales.
- Los bosques, son grandes sumideros naturales, cubren el 27% de la superficie terrestre, hay diferentes clasificaciones; varían según su ubicación geográfica, clima, flora y fauna; dependiendo de ello también se relaciona su capacidad de absorber carbono. El bosque tropical es el que almacena mayor cantidad y representan el 93% en cuanto a superficie boscosa, seguido de los bosques boreales y templados; todos pueden albergar el CO₂ por un periodo largo de tiempo si no son perturbados por el ser humano, debido que si se talan o se queman; se generan mayores emisiones de dióxido de carbono.
- La tundra también se clasifica como sumidero de carbono y aunque no cubra tanta superficie terrestre como los bosques, abarca el 20%, es el bioma más joven del mundo teniendo 10.000 años. Algo característico de este es el *permafrost*, el cual se forma debido a las bajas temperaturas es la capa de suelo que permanece a temperaturas menores a 0°C y alberga 1/3 del carbono secuestrado en el suelo. Razón por la cual, se encuentra amenazado con el calentamiento global y si se llega a derretir con las altas temperaturas del globo terráqueo, aquella cantidad de GEI secuestrada, sería liberada a la atmósfera; convirtiendo a este ecosistema en una fuente de carbono.

- Los sectores industriales identificados como grandes fuentes de gases de efecto invernadero son el de construcción y el energético. Las proyecciones para los años 2020 y 2050 indican que en el sector de la construcción la tecnología de CAC se conocerá y aplicará en mayor proporción lo que favorecerá la disminución de los precios, Se espera que en el 2050, con la implementación de la tecnología de CAC iniciando con la Unión Europea, se logre capturar 10Gt de CO₂ anuales.
- El sector energético emite el 35% de emisiones de GEI, siendo el 80% provenientes de plantas termoeléctricas, las emisiones en la industria cementera representan alrededor del 5% de las emisiones globales de CO₂ y la reducción en su demanda o sustitución no es aún una opción viable, debido a que tanto la energía como el cemento son claves para el diario vivir y para construir la infraestructura de la sociedad.
- Se proyecta la tecnología de captura y almacenamiento de carbono como la opción más eficiente en cuanto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; para el año 2020 se estima que se materialicen 30 grandes proyectos los cuales podrían capturar hasta el 45% de las emisiones antropogénicas producidas por industrias; para el año 2050 se espera que varios proyectos estén en operación los cuales captarán casi la mitad del CO₂ proveniente de fuentes industriales.
- Los costes de la CAC actualmente se encuentran elevados por varios factores, como la madurez tecnológica, los aspectos normativos y ambientales, asimismo, la percepción pública. Además, varían acorde al mercado del carbono el cual fluctúa constantemente, se estima que en los años venideros, la tecnología se vuelva más rentable y se siga implementando para disminuir las emisiones de dióxido de carbono provenientes de las industrias.
- La captura y almacenamiento de carbono es de gran importancia en relación con la mitigación del calentamiento global, se espera que pueda contribuir con la reducción de una sexta parte de las emisiones de CO₂ para el 2050. La Unión Europea es la pionera en investigación y desarrollo para CAC, aunque solo emite el 10% de los GEI antropogénicos del mundo.
- Al implementar la tecnología de captura y almacenamiento de carbono se espera reducir alrededor del 56% de las emisiones de CO₂ en la industria cementera para el 2050, pero para lograr un mayor porcentaje, se requiere del uso simultáneo de proyectos de eficiencia energética y energías renovables; lo anterior no solo aplica para el sector de construcción, sino también para el sector energético y los demás que emitan GEI en sus procesos.

11.RECOMENDACIONES

Debido a que el tema de la tecnología de captura y almacenamiento de carbono es reciente, es conveniente mantener actualizado el conocimiento y realizar futuras investigaciones en proyectos que aparecen en la tabla 5, donde aparecen unos que se prevé que pasaran a la fase de operación a lo largo del año 2017 y otros que en los años siguientes en países como Canadá, China, Estados Unidos, Australia y los Países Bajos se implementará la CAC.

Al revisar en la literatura se evidencia un vacío en el tema de almacenamiento oceánico, puesto a que hasta el momento proyectos con este tipo de almacenamiento a gran escala no se han realizado y hay gran oposición por parte de organizaciones ambientalistas, razón por la cual se recomienda investigar más a fondo; también es importante ahondar en la parte de los usos industriales de dióxido de carbono que se están dando y las que se pueden realizar; asimismo, la parte de costos para este tipo de tecnología (CAC), se relaciona con el mercado de carbono, los bonos de carbono, los CER y demás incentivos que motivan a las industrias y facilitan su adaptación a la tecnología, por lo tanto, también se requiere de mayor revisión para mayor entendimiento.

Otro tema del cual se recomienda adelantar investigación es respecto a la adaptación al cambio climático; hoy en día se habla de la mitigación y sólo se nombra superficialmente a la adaptación. De la misma manera, se recomienda indagar sobre cuáles son los factores por los cuales el mercado del carbono es tan variable, siendo que de este dependen varios proyectos a futuro, incluyendo al desarrollo de proyectos a gran escala de la captura y almacenamiento de carbono.

De la misma manera, se requiere adelantar investigación en la parte ambiental para una búsqueda que aumente el potencial de los sumideros naturales; y en la parte social, relacionado a la tecnología de captura y almacenamiento de carbono y el impacto que puede generar en la salud por riesgo de fugas y aumento de las actividades en la cadena de suministro de energía.

Para futuras investigaciones se recomienda indagar en los procesos de captura de dióxido de carbono; también se invita a examinar los temas de fotosíntesis artificial y BECCS, la cual es bioenergía con captura y almacenamiento; ambos son temas actuales que no se han desarrollado a profundidad y pueden llegar a tener una gran aplicación a futuro.

Debido a que el tema es reciente, la revisión bibliográfica en fuentes documentales de la Fundación Universidad de América tales como Scopus, EBSCO y OnePetro, fueron insuficientes para el desarrollo del presente trabajo, por lo que fue necesario indagar en bases de datos externas, en libros, artículos, publicaciones y páginas web que tienen la información y está actualizada, las principales son las de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y National Geographic.

BIBLIOGRAFÍA

ABC. La tundra y la taiga. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.abc.com.py/articulos/la-tundra-y-la-taiga-923062.html>

ACADEMIA. Bosque templado. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: http://www.academia.edu/5293714/Bosque_Templado

AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (IAEA). 20 hechos acerca de la acidificación del océano. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.iaea.org/ocean-acidification/download/Resources/Audience/Policy%20makers/OA20FactsSpanish.pdf>

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). La cadena del sector hidrocarburos. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.anh.gov.co/portalregionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>

AGUINACO, Vicente. Captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Academia de Ingeniería. 2008. 49p

ARAUS, Magdalena. Esta termoeléctrica captura su propio CO₂ para no contaminar (bueno, casi). [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/2528/Esta_termoelectrica_captura_su_propio_CO2_para_no_contaminar_bueno_casi/

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA (UNESA). Forestación y Reforestación. Sumideros de Carbono. En: Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto – Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica, 2005, citado por CARVAJAL, Micaela, et al. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. España, CSIC. 2014. p. 3.

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DEL PERMAFROST (IPA). What is permafrost?. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://ipa.arcticportal.org/publications/occasional-publications/what-is-permafrost>

ÁVILA, Isabel. Venteo de gas. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1887-Venteo-del-gas>

BADII, M. H; GUILLEN, O. Lugo y SÁNCHEZ, H. J. Aspectos del Calentamiento Global. En: Revista Daena (International Journal of Good Conscience. Vol. 10, No 2 (Ago, 2015); p. 175-195. ISSN 1870-557X

BAETHGEN, Walter y MARTINO, Daniel. Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono. En: Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. Vol.2, No. 2 (Jun, 2001); p. 128.

BANCO DE LA REPÚBLICA. Sectores económicos. [En línea]. [12 noviembre de 2016] disponible en: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores_economicos

BANCO DE LA REPÚBLICA. Sectores económicos. [En línea]. [14 febrero de 2017] disponible en: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores_economicos

BARROS, Vicente. Cambio climático global ¿Cuántas catástrofes antes de actuar?. 2 ed. Buenos Aires. Libros del Zorzal, 2006. 179 p. ISBN: 987-1081-88-X.

BBC. Nature wildlife, Tundra. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://www.bbc.co.uk/nature/habitats/Tundra>

BELLUSCIO, Ana. La importancia de la conservación de pastizales. [En línea]. [24 marzo de 2017] disponible en: <http://www.conicet.gov.ar/la-importancia-de-la-conservacion-de-pastizales/>

BENAVIDES, Henry y LEÓN, Gloria. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. En: Nota técnica del IDEAM. Vol. 8, (Dic, 2007); p. 5-36.

BENJAMÍN, José y MASERA, Omar. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques. Xalapa, México. Vol. 7. No.1. (2002); p. 3-12. ISSN: 1405-0471.

BENNACEUR, Kamel, *et al.* Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. En: Oilfield Review. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 48-65.

BIODIVERSIDAD. Pastizales. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales.html>

BIOPEDIA. Pastizales o praderas. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biopedia.com/pastizales-praderas/>

BIOPEDIA. Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.biopedia.com/tundra/>

BORRELL, Josep. Una perspectiva europea de los acuerdos de la 21a Conferencia sobre cambio climático de París (COP21). En: Revista de fomento social. No. 281. (Feb, 2016); p. 242. ISSN 0015-6043.

BROWN, Theodore, *et al.* Química, la ciencia central. 11ed. México: Pearson, 2009. p. 782. ISBN: 978-607-442-012-0.

CALETA, Olivia. Venteo de gas. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://www.caletao.com.ar/eco/temreleco/10/venteo.htm>

CÁMARA, Ángeles. Impacto del desarrollo de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ en el sector eléctrico. En: Revista de economía aplicada. Vol. 24, No. 72. 2016; p. 57-85. ISSN: 1133-455X.

CAMPS, M. y PINTO, M. Los sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. En: Edafología. Vol. 11, No.1 (2004); p. 27-36.

CANNIZZARO, Alejandro. Incendios de pastizales: prevenir, conocer y controlar. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: <http://www.conicet.gov.ar/incendios-de-pastizales-prevenir-conocer-y-controlar/>

CARBON CAPTURE & STORAGE ASSOCIATION. Frequently asked questions, what is a CCS plant? What will it look like?. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <http://www.ccsassociation.org/faqs/ccs-general/>

CARBUROS METÁLICOS. Dióxido de carbono. [En línea]. [1 marzo de 2017] disponible en: <http://www.carburos.com/products/Gases/Carbon-Dioxide.aspx>

CARDOZO, Lenin y MÉNDEZ, Hugo. Bosques boreales. La corona verde del planeta tierra, sus pobladores, clima, fauna, y flora. Maracaibo: Erato, 2016. 150p.

CARVAJAL, Micaela, *et al.* Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. España, CSIC. 2014. p. 3.

CENTRO INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DEL FENÓMENO DEL NIÑO (CIIFEN). Adaptación y mitigación frente al cambio climático. [En línea]. [7 febrero de 2017] disponible en: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=102&Itemid=341&lang=es

CHEEK, Joseph. What is happening to carbon in Arctic tundra permafrost?. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.sciencepoles.org/interview/what-is-happening-to-carbon-in-arctic-tundra-permafrost>

CHIODINI, G., et al. CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. En: Journal of Geophysical Research: Solid earth. Vol.106, 2001 citado por METZ, Bert, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 213p. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

CICLO DEL CARBONO. [En línea]. [6 febrero de 2017] disponible en: <http://www.ciclodelcarbono.com/>

CIENCIA Y BIOLOGÍA. Biomas terrestres: La tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://cienciaybiologia.com/biomas-terrestres/#Biomas_terrestres_la_tundra

CIENCIA Y BIOLOGÍA. Fitoplancton. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://cienciaybiologia.com/fitoplancton/>

CIESLA, William. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. Roma, España: Food & Agriculture Org., 1996. p. 16-129. ISBN: 92-5-303664-8.

CLUB PLANETA. Producto Interno Bruto. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.economia.com.mx/producto_interno_bruto.htm

CO₂CRC. Carbon dioxide (CO₂). [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: http://old.co2crc.com.au/aboutccs/greenhouse_gases.html

COMISIÓN EUROPEA. Captura y almacenamiento de CO₂. 2009. [En línea]. [21 abril de 2017] disponible en: <https://bookshop.europa.eu/es/captura-y-almacenamiento-de-co2-pbKO7809957/>

COMISIÓN EUROPEA. Captura y almacenamiento de CO₂. 2009. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://bookshop.europa.eu/es/captura-y-almacenamiento-de-co2-pbKO7809957/>

COMPENSAFOREST. Los sistemas forestales como sumideros de CO₂. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <https://compensaforest.es/los-sistemas-forestales-como-sumideros-de-co2/>

COMPENSAFOREST. Los sistemas forestales como sumideros de CO₂. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <https://compensaforest.es/los-sistemas-forestales-como-sumideros-de-co2/>

COMPUTERHOY. Investigadores cada vez más cerca de la captura de carbono. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://computerhoy.com/noticias/life/investigadores-cada-vez-mas-cerca-captura-carbono-54392>

CONSEJO EMPRESARIAL COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE (CECODES). Quienes somos. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: <http://www.cecodes.org.co/site/quienes-somos/>

CONSTRUDATA. Características generales del sector construcción-Colombia. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.construdata.com/BancoConocimiento/o/oit_colombia_caracteristicas/oit_colombia_caracteristicas.asp

DÁVILA, Moisés. Estado del almacenamiento geológico de CO₂ en México. 2012. p. 30.

DE SOUZA, Peter. Iniciativa busca poner fin a la quema de gas natural hasta el 2030. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://reportheenergia.com/v2/iniciativa-busca-poner-fin-a-la-quema-de-gas-natural-hasta-el-2030/>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). Cemento y sus aplicaciones. [En línea]. [15 febrero de 2017] disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/cemento.pdf>

DICAPRIO, Leonardo. Before the Flood. [Película documental]. Producido por Fisher Stevens. Estados Unidos, National Geographic Channel, 2016. 96 minutos.

DOMÉNECH, Juan L. Huella ecológica y desarrollo sostenible. Madrid, España: Aenor, 2007. p. 20-21. ISBN: 978-84-8143-517-7.

DUARTE, Carlos M, *et al.* Cambio Global, Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. 2da. Madrid, España: CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas). 2006. 170 p. ISBN: 978-84-00-08452-3.

DURKIN, Martin. La gran farsa del calentamiento global. [documental]. Reino Unido, 2007. 75 minutos.

ECOEficiencia. Bonos de carbono, ¿qué son y cómo funcionan?. [En línea]. [7 febrero de 2017] disponible en: <http://ecoeficiencia.com.co/bonos-de-carbono-que-son-como-funcionan/>

ECOLOGISTAS EN ACCION. Captura y almacenamiento del carbono. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.ecologistasenaccion.org/article22923.html>

ECOSISTEMAS, Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://ecosistemadcc.weebly.com/tundra.html>

EDP. ¿Cómo produce electricidad una central térmica?. [En línea]. [16 febrero de 2017] disponible en: <https://www.sostenibilidadedp.es/pages/index/proceso-de-produccion-de-una-central-termica>

ESCOSA, Jesús. Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado: Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón, 2009; 256 p. ISBN 978-84-692-1629-3.

ESPIE, A.A. CO₂ Capture and Storage: Contributing to sustainable world growth. International Petroleum Technology Conference. 2005. p. 4.

ESPINAL, L.S. Geografía ecológica del departamento de Antioquia. En: Revista de la Facultad Nacional de Agronomía. Vol. 38, No°.1. 1985. p. 24-39; MURPHY, P.G y LUGO, A.E. Ecology of tropical dry forest. En: Annals Review of Ecology and Systematics. Vol. 17. 1986. P. 67-68, citado por Instituto Alexander von Humboldt (IAVH). El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia. 1998. 24p.

EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION (ECF); World Energy Council (WEC); Universidad de Cambridge a través de la Judge Business School (CJBS) y Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL). Cambio Climático: Implicaciones para el Sector Energético. Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. En: El clima, un asunto de todos, 2014. 16p.

EUROPEAN COMMISSION. Comprender los gases de efecto invernadero. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf

FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. Los sumideros de carbono a nivel local. 2011. 162p

FOLGER, Peter. The carbon cycle: Implications for climate change and congress. En: Carbon capture and storage including coal-fired power plants. Washington D.C, 2009. p. 99-111. ISBN: 978-1-60741-196-3.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Adaptación y mitigación al cambio climático. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/climate-change-adaptation-and-mitigation/basic-knowledge/es/>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Combatir el cambio climático con los pastizales. [En línea]. [21 marzo de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/38943/icode/>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). El cambio climático y los bosques. En: Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales. No. 172. Roma, 2013. p. 7-11 .E-ISBN: 978-92-307832-5.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático, los suelos juegan un papel clave en el ciclo del carbono. [En línea]. [6 marzo de 2017] disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/Fact_sheets/Es_IYS_CICng_Print.pdf

GARCÍA, Juan Carlos. El bosque boreal de coníferas. Universidad de Cantabria. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/tema-3/3.3.4-el-bosque-boreal-de-coniferas>

GOEDDER, Carlos. Informe de Banco Mundial proponen reducir quema y venteo de gas natural. [En línea]. [24 febrero de 2017] disponible en: <http://inteligenciapetrolera.com.co/inicio/informe-de-banco-mundial-proponen-reducir-quema-y-venteo-de-gas-natural-por-carlos-goedder/>

GREEN FACTS. Dióxido de carbono (CO₂). [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/dioxido-carbono.htm>

GREEN FACTS. Forzamiento radiativo. [En línea]. [29 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/glosario/def/forzamiento-radiativo.htm>

GREENFACTS. Captura y almacenamiento de CO₂. [En línea]. [31 enero de 2017] disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/l-2/2-fuentes-dioxido-carbono.htm>

GREENPEACE. 9 datos curiosos sobre el Gran Bosque Boreal. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/Blog/9-datos-curiosos-sobre-el-gran-bosque-boreal/blog/58245/>

GREENPEACE. Captura y secuestro de carbono (CCS) una inyección arriesgada. [En línea]. [22 abril de 2017] disponible en: http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/captura-y-secuestro-de-carbono-2.pdf

GRUPO BANCO MUNDIAL. Rusia y Kazajstán, líderes en reducción de la quema de gas y bajas emisiones. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2011/06/27/russia-kazakhstan-lead-way-to-reduce-gas-flaring-and-lower-emissions>

GRUPO CONSULTIVO DE EXPERTOS (GCE). Manual del sector de la energía. Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Sector de la Energía: quema de combustibles. [En línea]. [25 marzo de 2017] disponible en: https://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_natcom/training_material/methodological_documents/application/pdf/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Anexo I, Glosario. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-annex-sp.pdf>

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). Glosario de términos: fitoplancton. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>

GUTIÉRREZ, Wilfredo. COP 21: Acuerdo contra el cambio climático en París. En: Apuntes de Ciencia & Sociedad. Vol. 5, No. 2 (2015); p. 1-3. ISSN-e 2225-515X.

HAGAN, John y LEPAGE, Liza. Litmus Test: How we're changing the chemistry of our oceans. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://magazine.manomet.org/winter2014/litmustest.html>

HARDT, Marah. La vida oceánica, amenazada. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/numero/409/la-vida-ocenica-amenazada-8425>

HARPER, Gilberto. Tecnologías de generación de energía eléctrica. Limusa, 2009. 386p. ISBN: 978-60-70501-35-7.

HERNÁNDEZ, María. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. En: Terra Latinoamericana. Vol. 28.; No. 2. 2010; p. 139-147.

HERRÁN, Claudia. El cambio climático y sus consecuencias para América latina. En: Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert-FES. México: 2012, p. 8.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia. Bogotá, 2015. p. 5. ISBN: 978-8902-94-4.

INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT (IAVH). El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia. 1998. 24p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system. Francia: MSDS, 2012. p. 339. ISBN: 978-92-64-17488-7 citado por CÁMARA, Ángeles. Impacto del desarrollo de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ en el sector eléctrico. En: Revista de economía aplicada. Vol. 24, No. 72. 2016; p. 57-85. ISSN: 1133-455X.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, citado por MARTÍNEZ, Isabel. Simulación del proceso de captura de CO₂ mediante los ciclos de carbonatación/calcinación de CaO integrado en plantas de producción de energía. Zaragoza, 2014, 223p. Tesis doctoral (Doctorado de Energías Renovables y Eficiencia Energética). Universidad de Zaragoza.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). System for the analysis of Global Energy Markets. [En línea]. [8 septiembre de 2004] disponible en: http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/figure_17.html, citado por BENNACEUR, Kamel, et al. Captación y almacenamiento de CO₂: Una solución al alcance de la mano. En: Oilfield Review. Vol. 16, No. 3, 2004; p. 49.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Technology Roadmap: Cement, 2009. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-cement.html>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2004 Insights. IEA/OECD, París, Francia. 2004 citado por ESCOSA, Jesús. Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado: Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón, 2009; 256 p. ISBN 978-84-692-1629-3.

IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio climático 2014, Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. 2015. 157p.

ISAZA, José Fernando y CAMPOS, Diógenes. Cambio climático: Glaciaciones y calentamiento global. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2007. ISBN: 978-958-9029-89-3. p. 158.

JANDL, Robert. Secuestro de carbono en bosques: El papel del suelo. En: Revista Forestal Iberoamericana. Vol. 1, N°.1. 2005. 6p.

KANNINEN, Markku. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s09.htm>

KI-MOON, Ban. Cambio climático. [En línea]. [19 enero de 2017] disponible en: http://www.cinu.mx/minisitio/cambio_climatico/

LA RED 21. Bosque Boreal, uno de los pulmones más grandes del planeta. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.lr21.com.uy/ecologia/1315649-bosque-boreal-taiga-peligro-amenazas-cambio-climatico>

LABORATORIO AMBIENTAL MARINO DEL PACÍFICO (PMEL). Land-Permafrost. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/detect/land-permafrost.shtml>

LATORRE, Andrés. La industria del cemento en Colombia, determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005). Monografía en Ciencias Económicas–Facultad de Ciencias Económicas, Pontificia Universidad Javeriana. 2008. p. 4.

LAUREANO, Raquel; FERNÁNDEZ, María y LEDESMA, Juan. Inventario de sumideros de carbono de Extremadura. Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente. Junta de Extremadura ed. INDUGRAFIC, artes gráficas, S.L., 2010. 200p. ISBN: 978-84-606-4881-9.

LLAMAS, Bernardo. Captura y almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura geológica como almacén de CO₂. Vol. 20. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva-España, 2016. p. 29. ISBN: 978-84-92679-12-6.

LLAMAS, Liliana, *et al.* Ciclo biogeoquímico del carbono, la Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <https://ecobiouvm.files.wordpress.com/2008/03/ciclo-del-carbono.pdf>

LORD, Natalie, *et al.* An impulse response function for the "long tail" of excess atmospheric CO₂ in an earth system model. En: Global Biogeochemical Cycles. Vol. 30, No.1 (Sept, 2016); p. 7.

MARÍN, José y HERNÁNDEZ, Elizabeth. Los humedales, sus funciones y su papel en el almacenamiento de carbono atmosférico. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/172-los-humedales-sus-funciones-y-su-papel-en-el-almacenamiento-del-carbono>

MARTÍNEZ, Isabel. Simulación del proceso de captura de CO₂ mediante los ciclos de carbonatación/calcinación de CaO integrado en plantas de producción de energía. Zaragoza, 2014, 223p. Tesis doctoral (Doctorado de Energías Renovables y Eficiencia Energética). Universidad de Zaragoza.

MARTÍNEZ, José María, *et al.* Tecnologías de captura de CO₂. En: El futuro del carbón en la política energética española. Fundación para Estudios sobre la Energía. Madrid: TIASA, 2008. p. 186.

MASTRÁNGELO, Sabino. Conceptos de generación termoeléctrica: Combustibles utilizados e impactos ambientales. En: Boletín energético. Vol. 11, 2008; p.14.

METZ, Bert, *et al.* IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 442p. ISBN: 13-978-0-521-86643-9.

MILLER, Charles. ¿Es el permafrost del Ártico el "gigante dormido" del cambio climático?. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/24jun_permafrost

MILLER, Paul y ATEN, Chris Van. Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). Montreal, 2004. 93p. ISBN: 2-923358-12-0.

MOLINER, Rafael. Ecología humana y energía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). [En línea]. [30 Enero de 2017] disponible en: http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/ecologia_humana_y_energia

MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, 101p.

MUÑOZ, César; MORA, Pedro y RECALDE, José. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento. Agrupación de fabricantes de cemento de España, 2011. 102 p. ISBN 978-84-615-5702-8.

NASA. Buenas noticias sobre los bosques y el dióxido de carbono. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/31dec_forests

NATIONAL GEOGRAPHIC. Amenazas para la tundra. [En línea]. [30 enero de 2017] disponible en: <http://nationalgeographic.es/medio-ambiente/habitats/amenazas-tundra>

NATIONAL GEOGRAPHIC. Causas del calentamiento global. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/calentamiento-global-causas>

NATIONAL GEOGRAPHIC. El incierto futuro de la captura y almacenamiento de carbono. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/noticias/medio-ambiente/energia/captura-almacenamiento-carbono>

NATIONAL GEOGRAPHIC. La NASA presenta una simulación con los flujos de dióxido de carbono. [En línea]. [2 marzo de 2017] disponible en: <http://nationalgeographic.es/noticias/simulacion-dioxido-carbono-noticia-utm-source-yhoo-utm-medium-partner-utm-campaign-yhoo>

NATIONAL GEOGRAPHIC. Tundra. [En línea]. [10 marzo de 2017] disponible en: <http://www.nationalgeographic.com/environment/habitats/tundra-biome/>
NAUCLÉR, Tomas; CAMPBEL, Warren y RUJIS, Jurriaan. Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics. McKinsey & Company. 2008. 53p.

NEGRÓN, Gloriselle. ¿Qué es el oscurecimiento global?. En: Catedrática Asociada en Salud Ambiental, Programa de Agricultura, Mercadeo y Recursos Naturales, 2011. p. 2.

NEOFRONTERAS. Los bosques primarios son sumideros de carbono. En: NeoFronteras. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://neofronteras.com/?p=1275>

NI, Kunming, *et al.* The global potential for carbon capture and storage from forestry. En: Carbon Balance and Management. Vol. 11, No. 3, 2016. p. 1

NOTAS DEL MEDIO AMBIENTE. Los humedales costeros, aliados contra el calentamiento global. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.notasdelmedioambiente.com/los-humedales-costeros-aliados-contra-el-calentamiento-global/>

OCEANA. Gases de Efecto Invernadero. [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: <http://eu.oceana.org/es/node/46897>

OFOSU-ASIEDU. A. El intercambio de experiencias y situación del conocimiento sobre la ordenación forestal sostenible de los bosques tropicales húmedos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, Brasil. p. 249-267.

ORDOÑEZ, A. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F. 1999, citado por BENJAMÍN, José y MASERA, Omar. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques. Xalapa, México. Vol. 7. No.1. (2002); p.6. ISSN: 1405-0471.

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ALCALDES (OLA). La futura pérdida de diversidad en el fitoplancton y su efecto climático. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <http://www.oladsc.org/index.php/2015/10/05/la-futura-perdida-de-diversidad-en-el-fitoplancton-y-su-efecto-climatico/>

PARDOS, José. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria); 2010. p. 26. ISBN: 978-84-7498-529-0.

PETROLNEWS. Captura de gases de venteo. En: Revista Nuevas Energías. [En línea]. [3 abril de 2017] disponible en: <http://www.petronews.net/noticia.php?ID=3a25ea&r=15221>

PIEPRZYK, Björn y ROJAS, Paula. Quema de gas asociado: Desarrollo actual y efectos del petróleo marginal. ERA-Energy Research Architecture, 2015. 25p.

PIZANO, Camila, *et al.* Bosques secos tropicales en Colombia. . [En línea]. [14 marzo de 2017] disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/proyectos/en-desarrollo/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Humedales. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: http://agronomia.uc.cl/component/com_sobipro/Itemid,232/fid,218.1060/sid,87/task_download.file/

PORTAFOLIO. Mercado de carbono: débil, pero es un buen incentivo. En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/mercado-carbono-debil-buen-incentivo-54092>

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA) y PROYECTO CIUDADANÍA AMBIENTAL GLOBAL. Manual de ciudadanía ambiental global: Cambio climático. Proyecto ciudadanía ambiental global. México D.F, 2005. 33p. ISBN: 968-7913-38-X

PULIDO, Ana y SIERRA, Magda. Módulo de energía. En: Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero 2000-2004. ed. Bogotá: IDEAM, 2009. p. 67-116. ISBN: 978-958-96863-7-9.

RAMSAR. La convención de RAMSAR y su misión. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convenci%C3%B3n-de-ramsar-y-su-misi%C3%B3n>

RAMSAR. Los humedales y la reunión sobre el cambio climático de la COP15 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Copenhague, 7 a 18 de diciembre de 2009). Nota informativa del Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) y la Secretaría a las Partes Contratantes. [En línea]. [7 marzo de 2017] disponible en: http://archive.ramsar.org/pdf/strp/strp_briefing_climate_2009_s.pdf

REGISTRO DE EMISIONES Y TRANSFERENCIAS DE CONTAMINANTES (RETC). Fuente fija (estacionaria). [En línea]. [25 marzo de 2017] disponible en: <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-42137.html>

RIAZA, Juan. Captura de CO₂ en centrales termoeléctricas mediante co-combustión de carbón y biomasa en condiciones de oxicomustión. Oviedo, 2014, 216p. Tesis doctoral (Doctorado Ingeniería Energética). Universidad de Oviedo, Instituto Nacional del Carbón (INCAR)-CSIC.

RICE, William. Los pastizales africanos. California: Teacher Created Materials, Inc., 2005. 29p. ISBN: 0-7439-0048-0.

RIESGO Y CAMBIOCLIMÁTICO. Adaptación y mitigación. [En línea]. [13 febrero de 2017] disponible en: <http://www.riesgocambioclimatico.org/adapymitigacion.html>

RÍOS, Aida. Captación de CO₂ antropogénico en el Atlántico. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: http://www.udc.es/iuem/documentos/doc_xornadas/cambioclimatico/aidafdez.pdf

ROA-GARCÍA, María y BROWN, Sandra. Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río barbas (Quindío, Colombia). Calsasia. Vol. 38, No. 1 (Ene, 2016); p. 117-135. ISSN: 2357-3759.

ROCA, José. Esto tendría que hacer el planeta si quiere acabar con las emisiones procedentes del sector energético. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/esto-tendria-que-hacer-el-planeta-si-quiere-acabar-con-las-emisiones-procedentes-del-sector-energetico/>

ROMEO, Luis, *et al.* Captura y almacenamiento de CO₂. Vol. 176. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. 227p. ISBN: 978-84-92521-69-2.

ROSAS, Carlos Al. Sumideros de carbono: ¿Solución a la mitigación de los efectos del cambio climático? En: Revista Ecosistemas. Vol. 11, No. 3 (sept, 2002); p.1-2.

SAAVEDRA, Néstor y JIMÉNEZ, Favio. Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. En: Revista de Ingeniería, No. 40. (Mayo, 2014); p. 50-56.

SANZ, Íñigo. La captura y almacenamiento de carbono: Una novedosa técnica de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero regulada por la Unión Europea. En: Revista de la facultad de derecho PUCP. No. 70, 2013. p. 165-186. ISSN: 0251-3420.

SCHNEIDER, Heloísa y SAMANIEGO, Joseluis. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. En: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile: 2009, p. 5.

SEEBERG, Christina. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Roma: FAO, 2010. 39p.

SISTEMA EUROPEO DE NEGOCIACIÓN DE CO₂ (SENDECO₂). Precios CO₂. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL (SINIA). ¿Qué es el mercado del carbono?. [En línea]. [20 abril de 2017] disponible en: <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-48293.html>

SOLOMON, Susan; QIN, Dahe y MANNING, Martin. Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento. [En línea]. [29 enero de 2017] disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html

SOLOMON, Susan; QIN, Dahe y MANNING, Martin. Gases de efecto invernadero. [En línea]. [28 enero de 2017] disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html

STERN, Nicholas. The economics of climate change: The stern review. Cambridge University Press; 2007. p. 222.

SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA). Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Chile-Miraflores, 2014. 25p.

TALBOT, David. Canadá pone en marcha su primera central termoeléctrica de carbón que captura el CO₂. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.dyna-energia.com/noticias-ES/canada-pone-en-marcha-su-primer-central-termoelectrica-de-carbon-que-captura-co2>

TENARIS. Centrales Eléctricas a Carbón. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.tenaris.com/es-ES/Products/PowerGeneration/CoalFiredPowerPlants.aspx>

THE ROYAL SOCIETY. Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. London, 2009. p. 77. ISBN: 978-0-85403-773-5.

TOLLEFSON, Jeff. La acidificación del océano está frenando el crecimiento de los arrecifes de coral. [En línea]. [9 marzo de 2017] disponible en: <https://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/la-acidificacion-del-oceano-esta-frenando-el-crecimiento-de-los-arrecifes-de-coral/#>

TORRES, David. Comportamiento de la industria del cemento y su incidencia en el crecimiento económico colombiano. Cartagena, 2015, p.36-40. Trabajo De Grado realizado para obtener el título de Economista. Universidad de Cartagena. Facultad de ciencias económicas. Programa de Economía.

TOSHIBA. Carbon Capture Technology. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/ccs/ccs.htm>

TOSHIBA. Thermal power generation - Introduction. [En línea]. [31 marzo de 2017] disponible en: <http://www.toshiba.co.jp/thermal-hydro/en/thermal/products/engineering/pleng.htm>

TRUMPER, Kate, *et al.* ¿La solución natural? el papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático, evaluación rápida del PNUMA. UNEP-WCMC. 2009. p. 34.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). International Energy Outlook 2013: with projections to 2040. Washington, 2013; 312p.

UNIDAD DE PLANIFICACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050. Bogotá, 2015. 184p.

UNIVERSIDAD DE PIURA. Análisis del Sector Construcción. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_97_204_59_903.pdf

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO (UVM). Tendencias de la tecnología de información: Sector construcción, 2013. [En línea]. [23 marzo de 2017] disponible en: <https://sites.google.com/site/ittrends2013/sector-construccion>

UNIVERSIDAD ESTATAL DE CAMPINAS. Biomás forestales templados. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/esp/esp-15.htm>

UPSACL. El bosque templado más grande del mundo acaba de ser salvado. [En línea]. [20 marzo de 2017] disponible en: <http://www.upsocl.com/verde/el-bosque-templado-mas-grande-del-mundo-acaba-de-ser-salvado/>

WARNER, Barry; ARAVENA, Ramón y MORENO-CASASOLA, Patricia. Cambio climático y reciclaje de carbono en los humedales costeros. En: Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Instituto de Ecología, AC y Gobierno del Estado de Veracruz-Llave Xalapa, México: 2005. p. 297-318.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Business Solutions to the United Nations Climate Summit. Action 2020. Abu Dhabi: 2014. p. 8.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Carbon pricing - The role of a carbon price as a climate change policy instrument, 2011. [En línea]. [23 abril de 2017] disponible en: http://wbcsdserver.org/wbcsdpublications/cd_files/datas/business-solutions/energy_climate/pdf/CarbonPricing.pdf

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD)-Batelle. The Cement Sustainability Initiative – Substudy 8: Climate Change. [En línea]. [1 marzo de 2002] disponible en: <http://www.wbcsd.org/web/publications/batelle-full.pdf> citado por MÜLLER, Nicolás y HARNISCH, Jochen. A blueprint for a climate friendly cement industry. Report for the WWF–Lafarge Conservation Partnership. WWF. Nürnberg, Alemania, 2008, p. 17

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). Países Amazónicos se unen para proteger el bosque tropical más grande del mundo. [En línea]. [14 marzo de 2017] disponible en: <http://www.wwf.org.co/?287472/Paises-Amazonicos-se-unen-para-proteger-el-bosque-tropical>

ZERO EMISSIONS PLATFORM (ZEP). CO₂ Capture-understanding the three technologies. [En línea]. [17 abril de 2017] disponible en: <http://www.zeroemissionsplatform.eu/ccs-technology/capture.html>

ZERO EMISSIONS PLATFORM (ZEP). The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. Post-demonstration CCS in the EU. 2011. 50p.