



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Viabilidad técnica del
almacenamiento de CO₂ en
basaltos en México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Yocabel Yumiko Sánchez Ayala

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo recibido durante mi estancia y ser mi Alma Mater.

A la Facultad la Ingeniería por la educación brindada en sus aulas.

A mis sinodales por tomarse el tiempo para revisar este trabajo, realizar las observaciones necesarias para que fuera lo mejor posible.

Al Dr. Moisés Dávila por permitirme desarrollar este trabajo y por su apoyo en la etapa final de mi carrera en la facultad.

Al Dr. Garza, por permitirme hacer el servicio social en su proyecto y por toda la confianza que me ha tenido, agradezco la ayuda y consejos que me ha dado.

A mis profesores por transmitirme sus conocimientos.

A mi mamá y a mi familia, por todo su apoyo brindado, no solo en la carrera, sino durante toda la vida.

A mis amigos por hacer mi estancia en la facultad más divertida, en especial a Alonso, Alan, Valeria y Emigdio por las buenas prácticas que vivimos, a Silja, mi primera amiga en la facultad, a Pilar y Laura por escucharme, a Danelia por ser una buena amiga y compañera en el servicio social.

A Rafael Valadez por ser un amigo incondicional, que me ha aguantado, aconsejado y escuchado en todo momento y en cualquier hora del día, que a pesar de que se encuentra del otro lado del mundo, aun estamos en contacto y ha estado en las buenas y en malas conmigo, muchas gracias.

A Ros, Marco, Adriana, Jorge y Sandra, la vida nos permitió conocernos y han sido momentos muy agradables en mi vida, gracias por esas maravillosas clases de historia del arte, en el que aprendo cada día algo nuevo.

A Leo, simplemente gracias.

Lista de Figuras

Fig.1.1. Principales fuentes de energía.

Fig. 1.2. Proceso de captura por Post-combustión. Se suministra aire a la caldera y se separa la fracción de CO₂, por solventes líquidos, del resto de la mezcla de los gases.

Fig.1.3. Proceso de captura por Oxi-combustión.

Fig.1.4. Proceso de captura por Pre-combustión.

Fig.1.5. Ejemplos de trampas estratigráficas.

Fig.1.6. Ejemplos de trampas estructurales.

Fig. 2.1. Principales tipos de almacenamiento.

Fig. 2.2. Inyección y almacenamiento oceánico por disolución y en forma de “lago” en el fondo oceánico.

Fig. 2.3. Proceso simplificado de la Recuperación Mejorada (EOR).

Fig. 2.4. Se muestra cómo las fallas normales, lístricas, etc., pueden actuar como sello o conducto, en regímenes tectónicos de extensión y compresión. Cada bloque por separado nos muestra en donde existe una mayor producción de metano debido a los bloques estructurales formados.

Fig. 2.5. Esquema de inyección en basaltos y formación de calcita.

Fig. 2.6. Secciones de basalto alterado de la zona de Islandia, observadas en microscopio electrónico de barrido, Universidad de Stanford.

Fig. 3.1. Ubicación del proyecto CarbFix, Islandia.

Fig. 3.2. Ubicación de pozos de inyección y monitoreo proyecto CarbFix, pozos HN-01, HN-02, HN-04, HK-34 son de inyección y/o monitoreo profundos, HK-13, HK-24, HK-12, HK-31, HK-25 Y HK-26 son pozos someros de monitoreo.

Fig. 3.3. Sección S-N, muestra la disposición de los flujos basálticos y las hialoclastitas, así como las zonas de alteración y pozos de inyección y monitoreo.

Fig. 3.4. Diagrama del proceso realizado para monitoreo del almacenamiento de CO₂ en el pozo de inyección HN-02.

Fig. 3.5. Gráfica de emisiones de CO₂ al año 2014 de Estados Unidos de América. Datos obtenidos de banco mundial.

Fig. 3.6. Provincia de Columbia, localización de las formaciones basálticas, potenciales en el almacenamiento de CO₂.

Fig. 3.7. Registro geofísico de pozo realizado por Schlumberger de la formación objetivo, señalando las zonas de inyección.

Fig. 3.8. Mapa de India, muestra lugares con las mayores emisiones de CO₂, el potencial de almacenamiento de las cuencas, las plantas eléctricas planeadas donde se integrará el sistema de captura de CO₂, zonas de basaltos de posible almacenamiento por mineralización.

Fig. 3.9. Sección de parte de la provincia volcánica del Deccan, muestra la disposición estratigráfica de las unidades.

Fig. 3.10. Sección sísmica NW-SE, de una sección de la provincia volcánica del Deccan, observando la disposición de sedimentos y trampa.

Fig. 4.1. Mapa muestra las dos provincias principales con volúmenes importantes de basaltos. SMO: Sierra Madre Occidental. FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.

Fig. 4.2. Mapa de Sonora, muestra los municipios con volúmenes importantes de basaltos. 1: Municipio de Yécora. 2: Municipio de Nácori Chico.

Fig. 4.3. Columna estratigráfica del área en carta Yécora, siendo los basaltos del Oligoceno un volumen importante.

Fig. 4.4. Sección geológica que muestra disposición general de los basaltos en el área de Yécora y como son afectados por fallas normales de la región.

Fig. 4.5. Columna estratigráfica del área de Nácori Chico.

Fig. 4.6. Sección geológica del área de Mesa Tres Ríos, principal área con un volumen importante de basaltos en el municipio de Nácori Chico.

Fig. 4.7. Mapa de Chihuahua, muestra los municipios con volúmenes importantes de basaltos. 1: Municipio de Moris. 2: Municipio de Madera. 3: Municipio de Buenaventura

Fig. 4.8. Columna estratigráfica, carta Moris. En la parte superior de la columna se observan los basaltos del Oligoceno, pertenecientes al episodio bimodal que dio origen a ellos.

Fig. 4.9. Columna estratigráfica de la región del municipio de Buenaventura.

Fig. 4.10. Localización de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su principal división, en Oeste, Centro, Este, que se extiende de la costa Occidental hasta el Golfo de México.

Fig. 4.11. Localización de las secuencias máficas en el estado de Nayarit, el área de Tepic con punto morado, SP: San Pedro en color naranja, CE: Ceboruco en color verde, por último, en el extremo inferior izquierdo en color azul, el área de Punta Mita.

Fig. 4.12. Localización de los pozos perforados por CFE en el área de San Pedro-Ceboruco, Nayarit. El pozo CB1 en color azul. El pozo CB2 en color rojo.

Fig. 4.13. Columnas estratigráficas de los pozos perforados por CFE en el área de San Pedro-Ceboruco. A la izquierda el pozo CB1, localizado al Suroeste del volcán Ceboruco, a la derecha el pozo CB2, localizado al Sur de San Pedro.

Fig. 4.14. Columna estratigráfica de la Costa de Nayarit, con presencia de basaltos alcalinos principalmente.

Fig. 4.15. Localización de la secuencia máfica del Mioceno en el área de Jalisco, en color gris, y con línea punteada su posible extensión de basaltos en el área. Secuencia San Cristóbal en color morado. Secuencia Santa Rosa en color rojo. Pozos perforados por CFE en la Caldera La Primavera en color verde.

Fig. 4.16. Columna estratigráfica que pertenece a un promedio de los pozos perforados por la CFE en la Caldera La Primavera, destaca la secuencia basáltica de Río Santiago.

Fig. 4.17. Columna estratigráfica del área de Río Santiago, la parte superior corresponde al episodio máfico del Mioceno que se desarrolló en el área de San Cristóbal-Santa Rosa.

Fig. 4.18. Columna estratigráfica pozo PR-9, caldera La Primavera.

Fig. 4.19. Sección geológica del área de la caldera La Primavera al río Santiago donde se localizan los volúmenes importantes de basaltos. Muestra las fallas que afectan a la zona y secuencia máfica. La falla A representa el sistema de fallas Plan de Barrancas inferido de un modelo gravimétrico. La falla B es el sistema de fallas Santa Rosa-Cinco Minas.

Fig. 4.20. Localización de la Secuencia Máfica de Querétaro (QMS). 1: Caldera de Amazcala. 2: Secuencia volcánica San Juan del Río. 3: Caldera de Amealco.

Fig. 4.21. Columna estratigráfica de la Secuencia máfica de Querétaro- San Juan del Río.

Fig. 4.22. Localización del área geotérmica de Pathé, Hidalgo.

Fig. 4.23. Columna estratigráfica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo.

Fig. 4.24. Sección esquemática muestra las fallas que afectan principalmente a la unidad basáltica del área de Pathé.

Fig. 4.25. Localización del Campo Volcánico Palma Sola en color azul. CVLT: Campo Volcánico Los Tuxtlas en color verde.

Fig. 4.26. Columna estratigráfica del campo volcánico Palma Sola, compuesto de andesitas y basaltos.

Fig. 4.27. Columna estratigráfica de campo volcánico Los Tuxtlas.

Fig. 4.28. Ubicación aproximada de los sitios posibles de almacenamiento en basaltos en México.

Fig. 4.29. Extensión de basaltos en el área de Sonora. A: Yécora, Sonora. B: Nácori Chico-Madera.

Fig. 4.30. Extensión de basaltos, C: San Pedro-Ceboruco, Nayarit. D: Río Santiago-Caldera La Primavera, Jalisco.

Fig. 4.31. Extensión de basaltos, E: Palma Sola, Veracruz.

Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de capacidades de almacenamiento por opciones de almacenamiento en el mundo (Según Vishal, et al., 2016).

Tabla 2. Resumen de sitios posibles para almacenamiento de CO₂.

Tabla 3. Resumen de emisiones de CO₂ de los estados con la posibilidad de almacenar CO₂ en basaltos y estados cercanos.

Índice

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Capítulo 1. Marco General de la Tecnología CCUS.	
1.1. Definición.	13
1.2. Captura.	13
1.2.1. Post-combustión.	13
1.2.2. Oxi-combustión.	14
1.2.3. Pre-combustión.	15
1.3. Transporte.	15
1.4. Almacenamiento.	16
1.4.1. Atrapamiento físico.	17
1.4.2. Atrapamiento químico.	18
1.5. Usos.	19
Referencias.	20
Capítulo 2. Tipos de almacenamiento geológico de CO₂.	
2.1. Almacenamiento oceánico de CO ₂ .	22
2.2. Recuperación mejorada de aceite y/o gas (EOR-EGR).	23
2.3. Almacenamiento en yacimientos de aceite y/o gas agotados.	25
2.4. Almacenamiento en acuíferos salinos profundos.	26
2.5. Almacenamiento en capas de carbón.	26
2.6. Almacenamiento de CO ₂ en basaltos.	29
Referencias	33
Capítulo 3. Experiencia Internacional en Almacenamiento de CO₂ en Basaltos.	
3.1. Proyecto CarbFix, Islandia.	37
3.1.1. Generalidades.	37
3.1.2. Marco Geológico.	39
3.2.2.1. Descripción del sitio.	39
3.1.3. Monitoreo.	41
3.2. Proyecto Big Sky, Wallula, Washigton, Estados Unidos de América.	43
3.2.1. Generalidades.	43
3.2.2. Marco Geológico.	44
3.2.3. Monitoreo.	46

3.3. Deccan Volcanic Province, India.	46
3.3.1. Generalidades.	46
3.3.2. Marco Geológico.	47
Referencias.	50
Capítulo 4. Viabilidad de almacenamiento de CO₂ en basaltos en México.	
4.1. Basaltos en México.	51
4.1.1. Basaltos en la Sierra Madre Occidental.	52
4.1.1.1. Basaltos en Sonora.	52
4.1.1.1.1. Yécora, Sonora.	53
4.1.1.1.1.1. Geología.	53
4.1.1.1.2. Nácori Chico, Sonora.	56
4.1.1.1.2.1. Geología.	56
4.1.1.2. Basaltos en Chihuahua.	58
4.1.1.2.1. Moris, Chihuahua.	59
4.1.1.2.1.1. Geología.	59
4.1.1.2.2. Buenaventura, Chihuahua.	61
4.1.1.2.2.1. Geología.	61
4.1.2. Basaltos en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).	62
4.1.2.1. Nayarit.	64
4.1.2.1.1. Geología.	66
4.1.2.2. Jalisco.	68
4.1.2.2.1. Geología.	69
4.1.2.3. Querétaro.	72
4.1.2.3.1. Geología.	73
4.1.2.4. Pathé, Hidalgo.	75
4.1.2.4.1. Geología.	75
4.1.2.5. Campo Volcánico Palma Sola.	77
4.1.3. Campo Volcánico Los Tuxtlas.	79
4.2. Sitios de posible almacenamiento de CO ₂ .	80
4.3. Conclusiones y Recomendaciones	87
Referencias	88

Resumen

En los últimos años, en las políticas internacionales se ha trabajado en acuerdos y tecnologías para reducir la cantidad de emisión de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global. El gas de efecto invernadero de mayor emisión en el mundo es el CO₂, siendo el sector energético el que produce la mayor cantidad.

México, en el acuerdo de París firmado en diciembre de 2015, se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Este acuerdo plantea el apoyo de países desarrollados a países en vías de desarrollo por medio de tecnología, investigación y alianzas, con el fin de reducir las emisiones antropogénicas que cada país se comprometió en el acuerdo.

Una de las tecnologías desarrolladas en el mundo durante décadas, es la captura y almacenamiento de dióxido de carbono; el cual se ha estudiado en el mundo y en el país con mayor profundidad en yacimientos de gas y/o aceite, y acuíferos salinos profundos.

Un tipo de almacenamiento que representa una mayor capacidad de almacenar CO₂, además de ser seguro y permanente, es en formaciones de basaltos. Las pruebas piloto iniciaron en Islandia y Estados Unidos a finales de la década pasada, arrojando resultados positivos durante 2013 y 2014. En México el estudio de almacenamiento en basaltos es prácticamente nulo, por lo que es importante incluir o descartar zonas en el país que contribuya a este tipo de almacenamiento.

Este trabajo se plantea en tres apartados principales. El primero consiste en las generalidades de la tecnología CCUS (acrónimo de *Carbon Capture, Utilization and Storage*), centrando la mayor parte de la información en el almacenamiento de CO₂. La segunda parte, permite conocer los proyectos principales de almacenamiento de CO₂ en basaltos en el mundo, y que han permitido conocer los parámetros básicos para este tipo de almacenamiento, siendo de los más importantes el proyecto CarbFix en Islandia, pionero en el almacenamiento en basaltos por mineralización, dando pie al estudio en otros sitios en el mundo, principalmente Estados Unidos e India.

En la última parte se proponen sitios para posible almacenamiento de CO₂ en basaltos en México, siendo analizados sitios en la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana con volúmenes importantes de basaltos, y que cumplen con algunos parámetros básicos para realizar este tipo de almacenamiento.

Abstract

In recent years, agreements and technologies have been put forward in the world to reduce the amount of greenhouse gas emissions that cause global warming. The highest emission gas in the world is CO₂, within the energy sector.

Mexico made a commitment -in the Paris agreement, signed in December 2015- to reduce its greenhouse gas emissions. This agreement outlines the support of developing countries to developing technology, investigation and alliances, in order to reduce the anthropogenic emissions that each country proclaimed in the agreement.

One of the technologies developed in the world for decades is the capture and storage of carbon dioxide; which has been studied in the world and with greater depth in gas and/or oil fields, and deep saline aquifers.

A type of storage that represents a greater capacity to store CO₂, besides being safe and permanent, is the basalt formations. One of the pilot tests started in Iceland and the United States at the end of the last decade, showing positive outcomes 2013 and 2014. In Mexico, the study of storage in basalts is practically nil, so it is important to include or discard areas in the country that allows performing this type of storage.

This work is divided in three main sections. The first part consists of the generalities of the CCUS technology, focusing most on the information about the storage of CO₂. The second part allows to know the main projects of storage of CO₂ in basalts in the world, which have allowed to know the basic parameters for this type of storage, being the most important the CarbFix project in Iceland.

In the last part proposes sites for possible storage of CO₂ in Mexico are proposed, sites in the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt with important volumes of basalts that fulfill some basic parameters to perform this type of storage where analyzed.

Introducción

La emisión en exceso de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera, ha contribuido al calentamiento de la corteza terrestre. El gas de mayor emisión debido a actividades antropogénicas es el CO₂, por lo que se ha trabajado en proyectos que contribuyan a reducir su emisión a la atmósfera. Han existido proyectos desarrollados en las últimas décadas enfocados en la captura y almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas, principalmente yacimientos de gas y/o aceite, y acuíferos salinos profundos. En los últimos años se inició la investigación en formaciones geológicas no convencionales como capas de carbón y basaltos, estos últimos representando una mayor capacidad de almacenamiento que en formaciones geológicas antes mencionadas.

México ocupa el lugar número once en el mundo en emisiones de CO₂, con 730 Mt de CO₂, con datos del Climate Analysis Indicator Tool del 2014, por atrás de China y Estados Unidos que ocupan los primeros lugares respectivamente. El INECC (*Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*), presentó en septiembre de 2018 el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) en el marco del Tercer Encuentro Nacional de México ante el Cambio Climático, los datos obtenidos del inventario corresponden de 1990 a 2015.

En 2015, de las emisiones de gases de efecto invernadero, el 71% corresponden a CO₂, seguido de metano (CH₄) con el 21%, con el 6% óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC) con el 1.8%, y por último con menos del 1%, el hexafluoruro de azufre (SF₆).

Del 71% (683 Mt) de CO₂, distribuidas en el sector energético (481 Mt), ganadería (71 Mt), procesos industriales (54 Mt), residuos (46 Mt), sector agricultura y otras fuentes (31 Mt).

De los datos anteriores, centrándonos en el sector energético, las emisiones de CO₂, se clasifican en dos rubros; en el sector transporte con el 36% (171 Mt), y la industria eléctrica 34% (165 Mt), seguido de industria de manufactura y construcción, petróleo, minería, entre otros, que en conjunto representan el 30% (145 Mt).

El CO₂ absorbido de forma natural sólo representa 148 Mt del total de las emisiones, por lo que es necesario promover el desarrollo de proyectos que reduzcan las emisiones antropogénicas. Aunque la tecnología CCUS es reciente en el país, representa una gran oportunidad a largo plazo hacia la reducción antropogénica de las emisiones de CO₂, principalmente en la industria eléctrica.

Capítulo 1

Marco General de la Tecnología CCUS

Cada día la población crece demandando el aumento de la producción de energía. En las últimas décadas se ha optado por introducir nuevas fuentes de energía que emiten menores emisiones de CO₂ a la atmósfera como la energía solar, eólica, geotérmica, nuclear, pero estos tipos de energía sólo representan el 19% total de la producción, mientras que los combustibles fósiles son y seguirán siendo la principal fuente de producción de abasto de energía (Fig. 1.1).

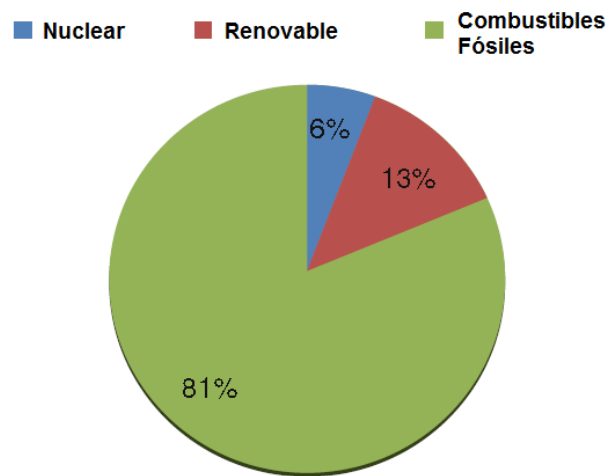


Fig.1.1. Principales fuentes de energía. Jain, N., et al. (2016).

Las emisiones de CO₂ han ido en aumento principalmente en el sector energético y transporte; una forma de mitigación de dichas emisiones que en las últimas décadas se ha estudiado y se han llevado a cabo proyectos piloto en el mundo, es la tecnología CCUS, y a la vez permite seguir usando combustibles fósiles, con lo que se brindan beneficios económicos y ambientales a largo plazo.

En México, debido a que se depende de gran manera de los combustibles fósiles, se ha buscado desarrollar la tecnología CCUS para contribuir a reducir las emisiones de CO₂ de una forma segura, investigando los ambientes geológicamente viables de llevar a cabo para su almacenamiento.

1.1. Definición.

Se define como la captura, transporte, uso y almacenamiento geológico de CO₂ a largo plazo. En algunos casos incluye su uso en la industria después de la captura.

En una fase inicial, el CO₂ que se emite por la industria y fuentes de energía es separado de otros gases para su captura, ya sea en estado líquido o gaseoso, posteriormente se transporta y se inyecta en el lugar de almacenamiento geológico. Ya almacenado el CO₂ es monitoreado y con los años se encuentra estable en la corteza terrestre.

1.2. Captura.

Dentro de la tecnología CCUS (cuyo acrónimo proviene de *Carbon Capture, Utilization and Storage*) la primera etapa es la captura del CO₂, para que el transporte y almacenamiento sea factible, es necesario producir un flujo de alta pureza de CO₂.

La captura de CO₂ se realiza en una fuente estacionaria, como lo son las plantas eléctricas, que funcionan con algún tipo de combustible fósil. Estas plantas necesitan de una mayor eficiencia para lograr separar el CO₂ del resto de los gases que produce la planta.

Principalmente, existen tres técnicas de captura de CO₂ para plantas eléctricas que funcionan con combustibles fósiles; estas técnicas dependen de elementos que permitan conocer si es viable el sistema de captura, como son el nivel de CO₂ presente en el gas exhausto, la presión del gas y el tipo de combustible. Las técnicas utilizadas son post-combustión, oxi-combustión y pre-combustión (Jain, N., et al. 2016).

1.2.1. Post combustión.

Consiste en separar el CO₂ de los gases producidos a partir de un proceso de combustión por medio de la absorción de este gas por solventes líquidos como la monoetanolamina, la concentración de CO₂ de la mezcla de gases de combustión es del 4 a 14%, los niveles de CO₂ en los gases son del 4-14%, y el resto es nitrógeno debido a que las plantas eléctricas utilizan aire para la combustión. (Fig. 1.2)

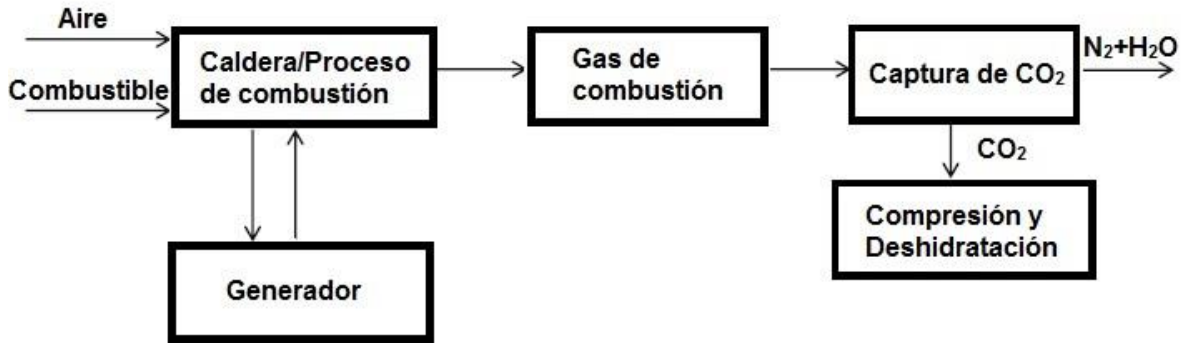


Fig. 1.2. Proceso de captura por Post-combustión. Se suministra aire a la caldera y se separa la fracción de CO₂, por solventes líquidos, del resto de la mezcla de los gases.

1.2.2. Oxi-combustión

Este método de captura consiste de separar el oxígeno del aire, para hacer más eficiente la combustión. Después de la combustión y de la remoción de SO_x, la mezcla de gas queda constituida por vapor de agua y la mayor parte es CO₂ (aproximadamente 90%). El vapor de agua se sustrae por enfriamiento (condensación) y el CO₂ se comprime. La separación por este método es más sencilla y adaptable a las plantas de energía existentes (Fig. 1.3). Una de las desventajas de este método es que, al necesitar de mayor cantidad de oxígeno puro, el costo se incrementa a comparación de otras técnicas.

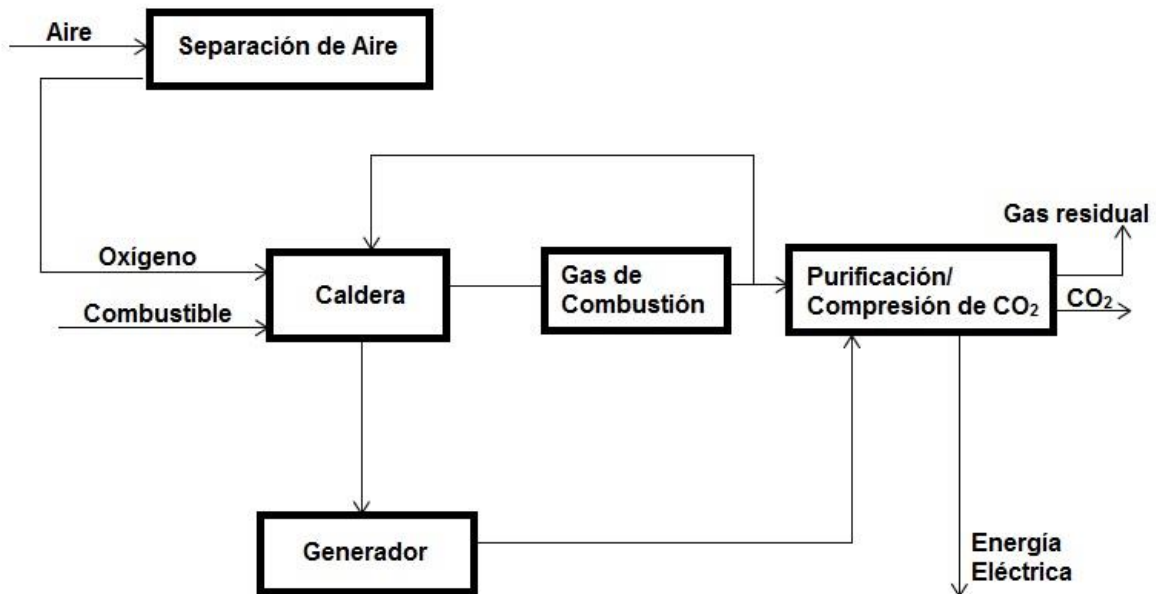


Fig.1.3. Proceso de captura por Oxi-combustión.

1.2.3. Pre-combustión.

En la técnica de captura previa a la combustión, los combustibles fósiles pasan por un proceso donde el vapor, aire u oxígeno y gases van a un reactor para conseguir principalmente CO (monóxido de carbono) y H₂. En la segunda fase el monóxido de carbono más vapor de agua se pasa por otro reactor donde el resultado es CO₂ más hidrógeno. A partir de este punto el CO₂ es más fácil de separar para su posterior almacenamiento (Fig. 1.4). Entre sus ventajas están la baja eficiencia necesaria para llevar a cabo el proceso y los bajos costos de compresión del CO₂.

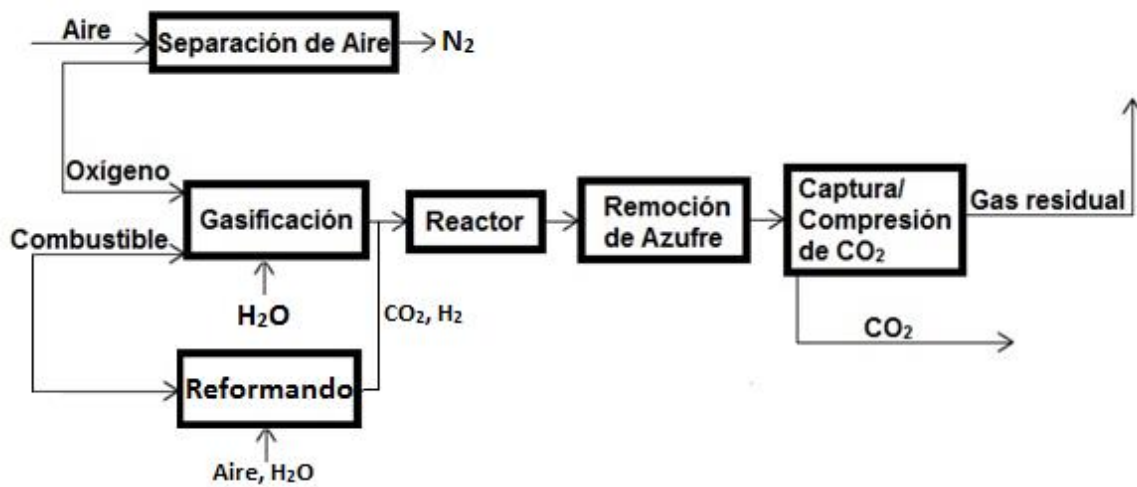


Fig.1.4. Proceso de captura por Pre-combustión.

El costo de la captación involucra la compresión del CO₂, el costo de captura depende del método utilizado oscila entre 33 y 87 dólares por tonelada de CO₂ capturado (Rubin, et al., 2015).

1.3. Transporte.

Después de la captura la siguiente etapa es el transporte al sitio de confinamiento, el CO₂ es transportado por medio de gasoductos, camiones cisterna, y barcos, para transportarlos al sitio final de almacenamiento. El transporte involucra factores económicos y de infraestructura. Aunque en años recientes la tecnología CCUS ha avanzado, aún no se tienen estándares o especificaciones para que el CO₂ sea transportado.

Para realizar un transporte rentable, el CO₂ es comprimido a una presión mayor a 8 MPa, aumentando su densidad, y facilitando su transporte. Existen factores como la distancia de la fuente al sitio de almacenamiento, costo, seguridad en el transporte, tipo de

almacenamiento que influyen en la selección del tipo de transporte. De manera habitual el transporte por gasoductos y barcos se utiliza para transportar el CO₂ a grandes distancias, y cuando las distancias son cortas se usan camiones cisterna.

Los costos dependen de la distancia, cantidad transportada y si el transporte es por tierra o mar. Por tierra, en un gasoducto de 250 km, el costo por tonelada transportada de CO₂ es de 1.7 a 4.9 dólares (Rubin, et al., 2015); si el transporte es marítimo, es más económico solo si las distancias son mayores a 1000 km (IPCC, 2005), el costo aproximado por tonelada cada 250 km es de 1.9 a 14.8 dólares (Rubin, et al., 2015).

Las fugas durante el transporte suelen ser casi nulas, aunque si llegan a existir, son pequeñas. De manera usual el transporte de CO₂ es seco, para evitar la corrosión de los gasoductos; si por el contrario la presencia de agua, se produce una mezcla corrosiva para la tubería (Bongartz, R. et al., 2015).

1.4. Almacenamiento.

La etapa final de la tecnología CCUS es el almacenamiento y se define como la inyección de CO₂ en formaciones geológicas profundas que sirvan como almacén. Estas formaciones deben ser porosas y con cierta permeabilidad. En el sitio de almacenamiento deben de existir dos capas impermeables (una superior y una inferior respecto a la roca almacén) que funcionen como roca sello, evitando la fuga de CO₂ al exterior de la roca almacén (Ramírez, 2011).

El almacenamiento debe garantizar el secuestro de CO₂ por largos periodos y el riesgo de fugas debe ser mínimo o nulo. La viabilidad económica respecto a los costos de almacenamiento por esos dichos periodos y el cumplimiento de las regulaciones ambientales jurídicas y sociales del lugar donde se lleve a cabo debe demostrarse.

Para asegurar un almacenamiento seguro, la formación de inyección debe de contar ciertos requisitos que se enuncian a continuación:

- Roca sello impermeable.
- Zona estructuralmente sencilla (pocas fracturas, fallas, pliegues).
- Zona tectónicamente estable.
- Roca almacenadora con buena porosidad y permeabilidad.
- Profundidades mayores a 800 m, de preferencia mayor a 1,000 m.

La situación ideal es que se cumplan los requisitos antes mencionados, aunque es posible llevar a cabo el almacenamiento en zonas donde existen fracturas y fallas, siempre y cuando éstas se estudien con detenimiento y la caracterización demuestre la imposibilidad de fugas de CO₂ a la atmósfera, al entorno del confinamiento, causando una mayor contaminación,

esto lleva a una mayor inversión y probabilidad de fuga de no realizar la caracterización correcta.

Existen distintos tipos de almacenamiento geológico: en acuíferos salinos profundos, yacimientos de aceite y/o gas agotados, en capas de carbón, almacenamiento oceánico y en basaltos, estos últimos se abordan de forma más detallada en el siguiente capítulo; la recuperación mejorada de aceite y/o gas (EOR) es considerado un uso del CO₂, debido que solo una parte del CO₂ se queda en el yacimiento.

Para cada tipo de almacenamiento existe un mecanismo de atrapamiento, dependiendo de las características de la formación en la que se hace el secuestro de CO₂. A continuación, se describen brevemente los mecanismos de atrapamiento más usuales.

1.4.1. Atrapamiento físico.

Los mecanismos de atrapamiento físico consisten en trampas estratigráficas, estructurales e hidrodinámicas. Las rocas con poca permeabilidad son las mejores para el atrapamiento físico de CO₂ en formaciones geológicas.

Las trampas estratigráficas consisten en el cambio repentino en la permeabilidad de los sedimentos, dando como resultado un cambio en la litología (Fig. 1.5), las cuales al inyectar el CO₂ se debe de hacer a una presión conveniente para evitar el fracturamiento de las rocas y evitar migración del CO₂.



Fig.1.5. Ejemplos de trampas estratigráficas.

Respecto a las trampas estructurales, son similares a las trampas estratigráficas, aunque el fenómeno que lo causa es estructural (por ejemplo, pliegues, fallas, fracturas) y no depende del sedimento o paquete de estratos. El CO₂ se queda atrapado abajo de la capa impermeable (Fig. 1.6), la cual evita que el CO₂ se escape.

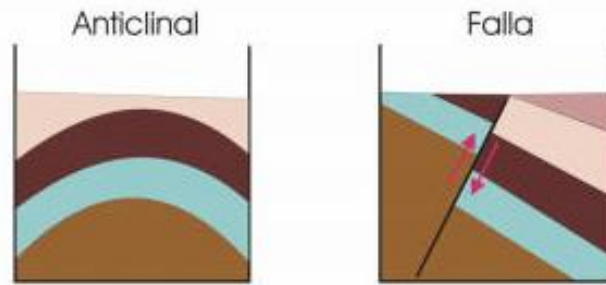


Fig.1.6. Ejemplos de trampas estructurales.

La captura hidrodinámica se realiza principalmente en acuíferos salinos profundos, con flujo regional y con velocidades lentas de transporte del orden de cm/año. Al inyectarse el CO₂ en un punto, éste irá migrando dentro del acuífero, el cual se irá disolviendo o atrapando; como la longitud del acuífero es de varios kilómetros, el CO₂ podría alcanzar la superficie después de miles o millones de años, si es que no se ha disuelto o atrapado mineralógicamente en el trayecto.

1.4.2. Atrapamiento químico.

Es una forma segura de retención geoquímica, donde el CO₂ reacciona con el agua de formación de la roca, para un posterior almacenamiento seguro y a largo plazo. El CO₂ tiene una menor densidad que el agua, el primero al disolverse en los fluidos de la roca se evita que este pueda ascender a la superficie y fugarse.

Los factores que influyen para que exista una mayor solubilidad son: temperatura, presión, pH, y salinidad, principalmente. Si la temperatura aumenta, la solubilidad del CO₂ disminuye.

En la naturaleza existe el proceso de la formación de carbonatos a partir de la reacción CO₂ con silicatos, este proceso en la naturaleza es lento, de hasta cientos o miles de años. Al ser un proceso lento, aunque seguro y permanente, en teoría no es viable por la cantidad de tiempo que le tomaba disolverse al CO₂ y convertirse en minerales de carbonato estables. Recientemente con el proyecto CarbFix (Islandia) se ha entendido y controlado este proceso y se ha vuelto viable, donde antes de inyectar el CO₂ en la roca, éste se disuelve en agua, el agua saturada con CO₂ acelera el proceso de liberación de cationes metálicos como Ca²⁺, Mg²⁺, y Fe²⁺, los cuales formarán los carbonatos estables en la naturaleza como calcita y aragonita (Snæbjörnsdóttir, S.O. et al., 2014). El proceso de formación de carbonatos se redujo de cientos y miles de años a solo dos años en el proyecto CarbFix, lo cual significa un gran avance en esta tecnología y un mecanismo de atrapamiento eficaz, seguro y con un tiempo de almacenamiento en escala geológica.

1.5. Usos.

El uso de CO₂ en la Recuperación Mejorada de Hidrocarburos (EOR por sus siglas en inglés), ha permitido combinar el enfoque ambiental del secuestro geológico de CO₂ con una actividad rentable de la industria de los hidrocarburos, pues el CO₂ ha resultado ser en muchas ocasiones, un agente importante para disminuir la viscosidad del petróleo y aumentar su hinchamiento con lo cual se prologa la vida de los campos ya maduros. Otra forma de complementar al almacenamiento es el uso del CO₂ en la industria química, el cual se ha llevado a cabo en escala menor; sin embargo, se estima que a corto plazo este uso industrial aumentará dramáticamente.

En los últimos años el uso de CO₂ ha sido de aproximadamente 130 Mt al año. Alrededor de 110 Mt es usada como materia prima, y 20 Mt en gas industrial; el principal uso es para la producción de urea y metanol, le sigue la producción de carbonatos cíclicos y ácido salicílico. Las aplicaciones directas del CO₂ se encuentran en la producción de fertilizantes, refrigeración, industria del tabaco, envasado de bebidas, y polímeros (Müller, T.E., et al., 2015).

Referencias.

Bongartz, R., Linssen, J., Markewitz, P. (2015). CO₂ Transportation. En W. Kuckshinrichs y J.F. Hake (Eds.), *Carbon Capture, Storage and Use* (pp. 47-63). Suiza: Springer.

Dávila Serrano, M. (2011). *Viabilidad técnica y ambiental del almacenamiento de CO₂ en México* (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional.

IPCC. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono.

Jain, N. Srivastava, A. Singh, T.N. (2016). Carbon Capture, Transport and Geologic Storage: A Brief Introduction. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 3-17). Suiza: Springer.

Müller, T.E., Leitner, W., Markewitz, P. (2015). Opportunities for Utilizing and Recycling CO₂. En W. Kuckshinrichs y J.F. Hake (Eds.), *Carbon Capture, Storage and Use* (pp. 47-63). Suiza: Springer.

Ramírez Reyes, R. (2011). *Almacenamiento Geológico de CO₂* (Tesis licenciatura para obtener título de Ingeniero Petrolero). Facultad de Ingeniería, UNAM.

Rubin, E.S., Davison, J.E., Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378-400.

Snæbjörnsdóttir, S.O. Wiese, F., Fridriksson, T., Ármansson, H., Einarsson, G.M., Gislason, S.R. (2014). CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63, 4585 – 4600.

Capítulo 2.

Tipos de almacenamiento geológico de CO₂

El almacenamiento geológico como se ha mencionado con anterioridad debe de ser seguro a largo plazo, los depósitos de almacenamiento posibles (Fig. 2.1), y de los que se hablará en este capítulo son los más importantes y de los que ya se tienen estudios realizados con anterioridad. El almacenamiento geológico de CO₂ representa una cantidad considerable de secuestro de CO₂ que no se emite a la atmósfera, contribuyendo a disminuir los efectos del cambio climático.

Las variantes de almacenamiento geológico comprenden yacimientos agotados de gas y/o aceite, asociado a recuperación mejorada de aceite y/o gas en yacimientos de campos petroleros maduros, acuíferos salinos profundos donde el agua no es potable y el CO₂ se diluye en la cuenca regional, en capas de carbón no que no son explotables, y por último en basaltos, es en este último donde se profundizará más que en los demás tipos de depósitos de almacenamiento de CO₂.

Desde hace décadas el almacenamiento geológico se ha visto como una forma confiable y a largo plazo para reducir las emisiones de CO₂, los depósitos con más estudios son los yacimientos de gas y/o aceite, debido a que la industria petrolera a lo largo de varias décadas ha realizado estudios detallados para entender el comportamiento de los yacimientos, esto ha servido para facilitar el estudio para el almacenamiento de CO₂, e incluso tener una retribución económica mientras se almacena el CO₂.

El almacenamiento geológico de dióxido de carbono se ha convertido más eficiente debido a que las tecnologías tanto de captura como mecanismos de almacenamiento se han vuelto más factibles, lo que permite que nuevas plantas eléctricas sean adaptadas con la nueva tecnología, sin embargo, la principal limitación es la distancia entre los puntos de emisión de CO₂ y el sitio de almacenamiento, involucrando mayor costo en el transporte; por lo que es importante encontrar más sitios de almacenamiento cercanos a las fuentes de emisión de CO₂.

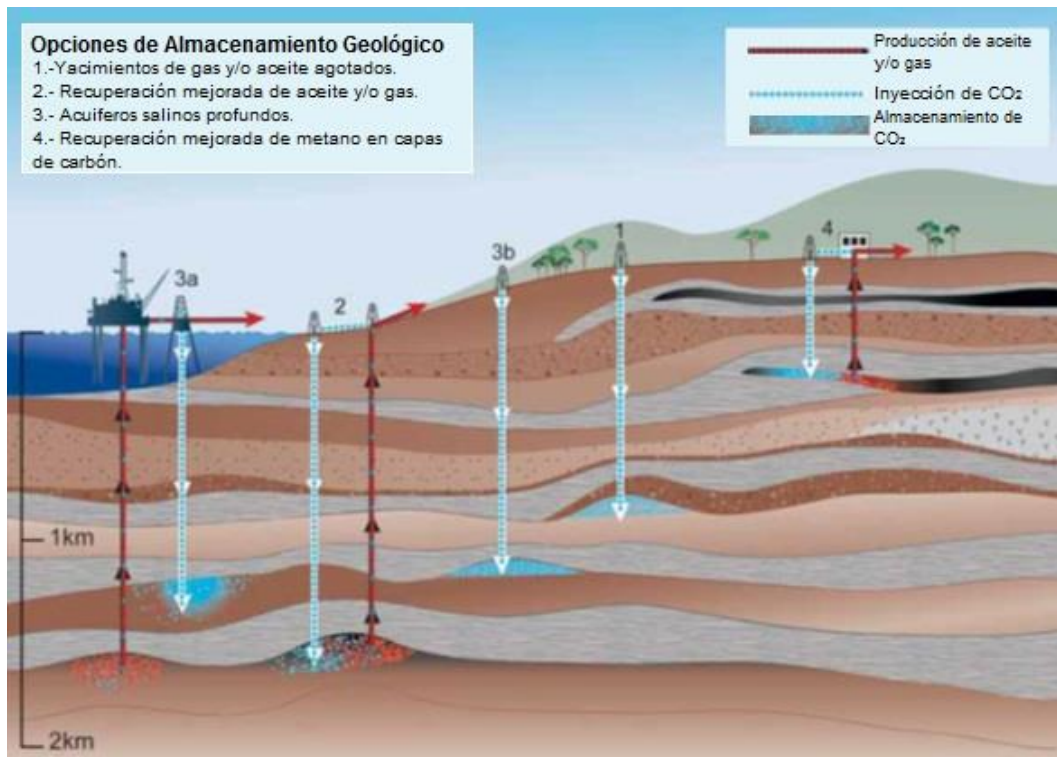


Fig. 2.1. Principales tipos de almacenamiento (IPCC, 2005).

2.1. Almacenamiento Oceánico de CO₂.

El almacenamiento oceánico de CO₂ aún no ha tomado gran fuerza y se tienen pocos estudios acerca de este tipo de almacenamiento, sin embargo, su capacidad de almacenamiento es alta comparada con otros depósitos de almacenamiento, y es capaz de convertir el CO₂ en parte del ciclo de carbono natural.

El océano juega un papel importante en la absorción natural de las emisiones antropogénicas de CO₂ siendo del 50%. Se estima que el océano absorbe 1 millón de toneladas de CO₂ por hora, siendo en promedio aproximadamente 530×10^9 Mt acumuladas en el océano (Prasad, N.T. et al., 2016). El almacenamiento oceánico (Fig. 2.2) consiste en que después de la compresión de CO₂ éste es inyectado a grandes profundidades, el CO₂ se disolverá en el océano o formará “lagos” de CO₂ en los cuales se controla la cantidad inyectada en el mismo lugar. Dependiendo de la formación y de la pureza del CO₂ se elige el método de inyección.

La inyección directa en plataforma oceánica requiere de 40-50 kWh por tonelada de CO₂ inyectada, se realiza a una profundidad de 3,000 m, y el almacenamiento es cerca de 500 años (Prasad, N.T. et al., 2016). Existen otros métodos importantes estudiados en los

últimos años, como es la liberación de bloques de hielo seco, los cuales hundirán en el océano. y la inyección en forma de hidratos a una profundidad de 1,000–1,500 m, disolviéndose completamente a los 2500 m.

Al no ser un método de almacenamiento estudiado con gran detenimiento, no se ha logrado saber cuál sería la escala del impacto real en el ecosistema de los océanos; se han realizado experimentos a pequeña escala, y se observa que el pH del océano se ve afectado, volviéndolo más ácido y peligroso para los corales y organismos carbonatados. Los científicos han comprobado que si se realiza a gran escala el almacenamiento antropogénico de CO₂ en el océano afectaría a la reproducción y mortalidad de los organismos, por lo que se buscan mecanismos que afecten lo menos posible al ecosistema.

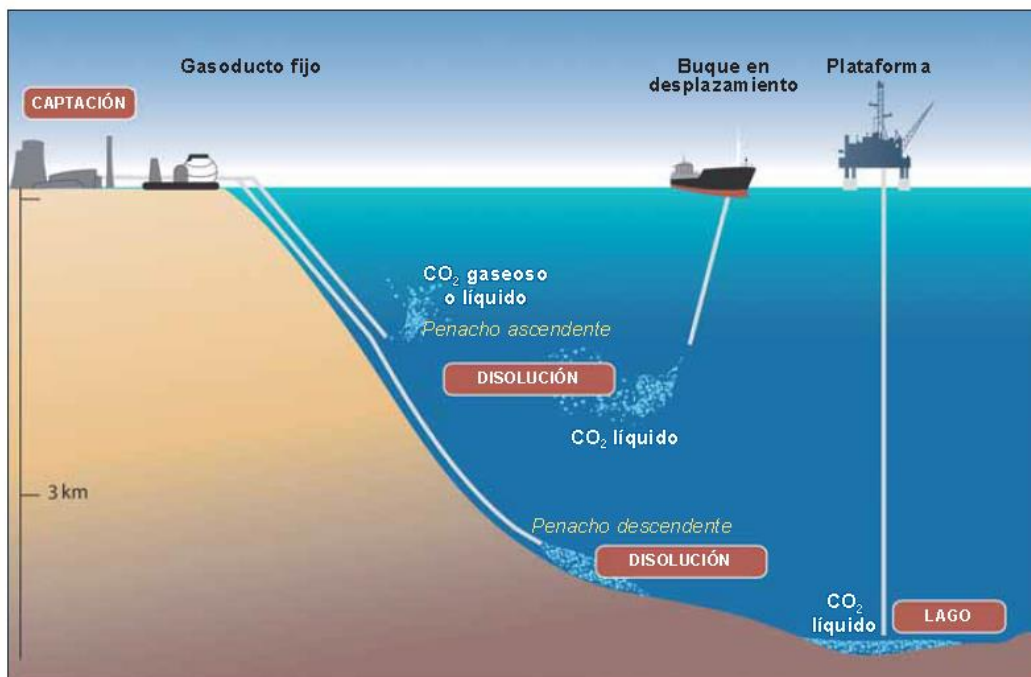


Fig. 2.2. Inyección y almacenamiento oceánico por disolución y en forma de “lago” en el fondo oceánico (IPCC, 2005).

2.2. Recuperación Mejorada de aceite y/o gas (EOR-EGR).

El almacenamiento por recuperación mejorada (EOR-EGR) ha sido el más utilizado en el mundo, debido a que se tienen dos beneficios, los cuales consisten en el almacenamiento seguro de CO₂ y la recuperación de petróleo de yacimientos prácticamente agotados, con lo cual se tiene una retribución económica.

Los primeros datos que se tienen de recuperación mejorada con fines de almacenamiento de CO₂ es a inicios de 1970 en Texas, Estados Unidos; a principios del año 2000 ya existían 84 proyectos en el mundo, de los cuales 72 se encontraban en Estados Unidos (Jain, N., et

al., 2016). La recuperación de aceite con CO₂ llega a ser en promedio del 25% adicional respecto a lo producido en la fase primaria.

El objetivo principal de la EOR-EGR es maximizar la recuperación del aceite y/o gas del yacimiento. El proceso se caracteriza por el desplazamiento multifase y multicomponente. La inyección de CO₂ se alterna con agua, el proceso se conoce como WAG (*Water Alternating Gas*), esto permite que el petróleo se expanda y fluya más fácilmente, lo que aumenta la recuperación del petróleo (Ettehadtavakkol, A., 2016).

La miscibilidad es una parte clave de este método, ya que determina la eficacia del desplazamiento que vaya a ocurrir. Se ha concluido que las condiciones para que ocurra la miscibilidad de estos dos componentes (petróleo-CO₂) es necesario:

- Alta presión (≥ 10 MPa).
- Temperatura menor a 60°C.
- Baja densidad del aceite, $\geq 30^\circ$ API, siendo aceite ligero a súper ligero.

Si se busca mejorar el almacenamiento de CO₂ en estos yacimientos, la profundidad debe ser mayor a los 600 m; aunque es posible hacerlo a menor profundidad, no se garantiza que el almacenamiento sea confiable.

En EOR el mecanismo de atrapamiento más seguro es el estructural y el atrapamiento mineral, siendo el más usado el estructural, debido a los estudios detallados que se tienen de cada yacimiento. Todos los proyectos no terminan por almacenar el total del CO₂, ya que al recuperar el aceite se recupera una parte del CO₂ inyectado, lo cual puede significar una desventaja con el método de almacenamiento.

El impacto ambiental propio de este proceso es el agua necesaria para reinyectar el CO₂ en el yacimiento ya que se producirá con una fracción de CO₂, la cual es inutilizable, otra situación persistente es la posible fuga de CO₂ por pozos abandonados que no hayan sido inventariados y controlados debidamente.

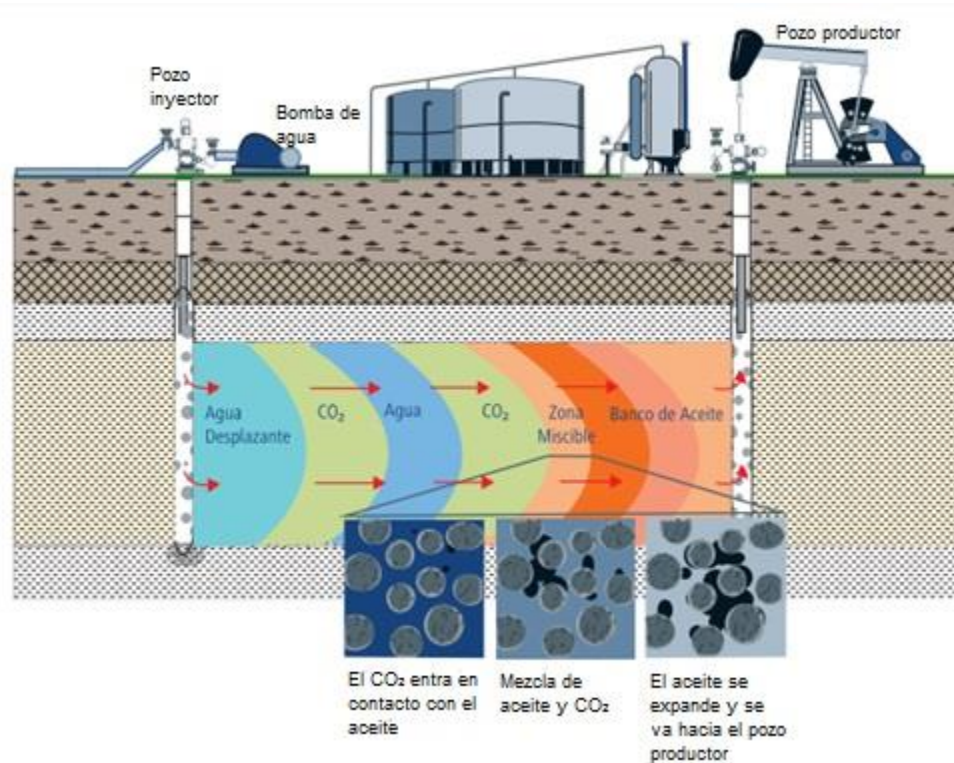


Fig. 2.3. Proceso simplificado de la Recuperación Mejorada (EOR), (CNH, 2012).

2.3. Almacenamiento en yacimientos de aceite y/o gas agotados.

Este tipo de almacenamiento se presenta en campos que ya no representan un valor económico en la producción de petróleo y/o gas y que cuentan con la caracterización para almacenar CO₂. La cantidad de CO₂ almacenada es calculada con respecto al volumen de hidrocarburos originales del yacimiento.

La inyección está limitada en evitar que la presión dañe la roca sello, la pérdida de presión del yacimiento durante la producción de hidrocarburos y la posterior inyección de CO₂ son factores importantes que considerar; depende de la presión de poro que se tenga para considerar si es posible inyectar el CO₂. Se han realizado estudios en los que la tensión de la roca en el yacimiento disminuye un 50–80% de la presión de poro, por lo que existe una mayor posibilidad de fracturar el yacimiento al utilizarlo como almacenamiento de CO₂ (Solomon, et al., 2010).

Una de las ventajas es que los pozos inyectores ya están en el lugar, y se cuenta con la infraestructura para realizar las operaciones de almacenamiento de CO₂.

2.4. Almacenamiento en acuíferos salinos profundos.

Los acuíferos salinos profundos consisten en acuíferos que se encuentran a una profundidad de más de 800 m, que contienen grandes cantidades de sales o se encuentran saturadas en salmuera. Tienen una roca sello y en ocasiones un acuitardo o acuícludo para separar el agua potable del agua salina, de forma frecuente las rocas que se encuentran en los acuíferos son rocas sedimentarias, las mejores rocas para almacenar CO₂ en acuíferos son las areniscas, por su alta porosidad y permeabilidad, siendo comunes también las rocas carbonatadas. Se estima que los acuíferos salinos profundos representan una capacidad de almacenamiento de 10,000 Gt de CO₂ en el mundo (Jain, N., et al., 2016).

Los requisitos esenciales para elegir el sitio de inyección de CO₂ según Shang, H., et al., 2011, son:

- Los acuíferos deben de ser de flujo regional, para permitir una mayor capacidad de almacenamiento.
- Profundidades mayores a 800 m.
- Roca sello con baja porosidad y permeabilidad, al inyectar el CO₂ se debe de cuidar de no fracturar la roca sello, evitando posibles fugas de CO₂.
- Alta porosidad y permeabilidad en la roca almacenadora, una alta porosidad provee un almacenamiento mayor, la permeabilidad alta permite que el CO₂ circule por el depósito evitando quedarse en un solo lugar y poder fracturar la roca sello.

Dos de los proyectos más importantes que se han desarrollado en acuíferos salinos son Sleipner, en el Mar del Norte e In Salah, en Argelia; ambos proyectos han sido a gran escala y proveen de información acerca del almacenamiento en estos depósitos y en general de la tecnología CCUS.

2.5. Almacenamiento en capas de carbón.

Se considera que el almacenamiento de CO₂ en capas de carbón es no convencional, debido a que existen cambios en la roca que retiene el CO₂. El potencial que tiene esta modalidad en el mundo es de almacenar aproximadamente 7.1 billones de toneladas de CO₂, asociado a las proyecciones de almacenamiento en otros depósitos geológicos es una cantidad considerable de CO₂ que no se emitirá a la atmósfera.

Las vetas de carbón están vinculadas con eventos tectónicos y bióticos, de manera natural el carbón almacena grandes volúmenes de CO₂, por lo que se ha estudiado para realizar el almacenamiento antropogénico de CO₂; el carbón por su estructura es capaz de almacenar 5 ó 6 veces más CO₂ que otros depósitos geológicos; tiene una afinidad química a adsorber tanto el CO₂ como otros gases, por ejemplo, el metano o nitrógeno.

En las vetas de carbón existe la recuperación mejorada de metano, debido a la afinidad química de adsorber el metano, al inyectarse el CO₂ este se adsorberá y se recupera el metano que exista en el depósito (alrededor del 90% de recuperación comparado con otras técnicas), la extracción de metano hace viable económicamente el almacenamiento en las capas de carbón (Jain, N. et al., 2016).

El carbón presenta una doble porosidad, microporosidad y macroporosidad, el CO₂ se adsorbe en los microporos del carbón, esta adsorción reduce el riesgo de fuga del CO₂, la presión en el depósito juega un papel importante para que exista el proceso de adsorción, mientras que una capa sello queda en segundo plano.

De los parámetros a considerar para el almacenamiento geológico en carbón son la permeabilidad, geología estructural, tectónica, estratigrafía y sedimentación, fluido en la zona de almacenamiento, calidad de carbón, presión y temperatura; el principal factor para que se pueda almacenar CO₂ en carbón es la permeabilidad, al inyectar el CO₂ en el carbón es posible que la permeabilidad se vea reducida, y es necesario que el carbón tenga cierta permeabilidad. Según Ramírez (2011) los principales criterios para seleccionar un área para inyectar CO₂ en carbón son:

- Permeabilidad, aunque no se han determinado valores mínimos, estudios realizados indican que una permeabilidad baja no es recomendable. Es un parámetro importante para decidir si se realiza el almacenamiento de CO₂ o recuperación mejorada de metano. Si la permeabilidad no es apta para ninguno de los dos casos, se descarta el sitio para estos fines.
- Los estratos de carbón deben de ser delgados, homogéneos y aislados verticalmente, los espesores de 3 a 10 m son los indicados.
- Estructuras geológicas simples, las fallas y fracturas tienen que ser pocas principalmente para evitar fugas, pero es necesario que existan fracturas naturales en el carbón, sin ellas, el carbón no puede ser utilizado como almacenamiento geológico de CO₂. Las fracturas que se encuentran en el depósito de manera natural proporcionan la permeabilidad necesaria para la recuperación mejorada de metano; mientras que las fallas dividen al depósito en bloques que producen distintas cantidades de metano, al igual que el estudio de las fallas es importante porque pueden actuar como sello del depósito donde se inyecta CO₂ o como un conducto de fuga (Pashin, J., 2016).
- Respecto a la profundidad no se ha determinado un mínimo, ya que el proceso de adsorción facilita que el almacenamiento pueda ser a baja profundidad, el metano disponible para recuperación mejorada se ha encontrado a 150 m, y el almacenamiento en carbón se ha estudiado hasta los 1,500 m.

- El carbón de la formación se debe deshidratar, ya que el carbón en estado húmedo representa una menor capacidad de almacenamiento (Jones, K.B, et al., 2015), al igual se tiene que conocer si el agua de la formación está protegida por la ley, lo que complicaría el almacenamiento de CO₂, el agua que se encuentra en el depósito puede catalogarse como potable a hipersalina, de ahí su importancia de conocer sus propiedades físico-químicas.
- Tipo de carbón, nos define cuál es la capacidad de almacenamiento de metano y de CO₂, dependiendo si se trata de vitrinita, inertinita o lipnita.
- El carbón debe ser no explotable, aspecto por analizar a profundidad, debido a que en la actualidad puede no ser explotable la veta de carbón, pero conforme se avance en tecnología de explotación, puede serlo, y no sería viable para el almacenamiento de CO₂.

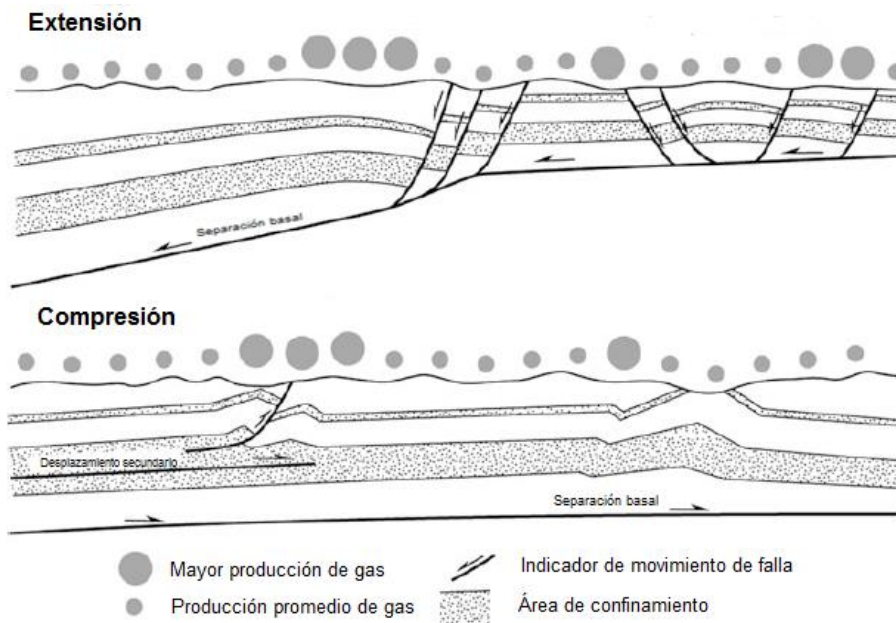


Fig. 2.4. Se muestra cómo las fallas normales, listricas, etc, pueden actuar como sello o conducto, en regímenes tectónicos de extensión y compresión. Cada bloque por separado nos muestra en donde existe una mayor producción de metano debido a los bloques estructurales formados. (Pashin, J., 2016)

En los últimos años se ha profundizado el estudio del almacenamiento en vetas de carbón, y cada vez existen menos dudas en su estudio. Lo que se debe tener en cuenta es que las características de cada depósito de carbón son únicas, y para conocer si se puede realizar sólo almacenamiento de CO₂ o recuperación mejorada de metano es importante caracterizar cada depósito.

2.6. Almacenamiento de CO₂ en basaltos.

El almacenamiento en rocas máficas, como basaltos, es una forma de almacenamiento no convencional al igual que el almacenamiento en las vetas de carbón; este tipo de depósito se considera de reciente estudio en comparación con los yacimientos de aceite y/o gas, o acuíferos salinos profundos que son ocupados para almacenar CO₂.

Los primeros estudios a mayor profundidad en este tema se realizaron con la puesta en marcha del proyecto CarbFix en 2007, en Islandia, aunque ya se comentó de esta opción de almacenamiento por parte de Seifritz (1990). El primer estudio que se desarrolla es por parte de Lackner, et al., (1995), mismo que no se veía como una opción de almacenamiento viable por la cantidad de interrogantes que existían y no se tenía un proyecto a gran escala que se llevara a cabo con éxito. A partir de CarbFix, existió un antes y un después en la viabilidad del almacenamiento en rocas basálticas, debido a que se comprobó que es un método seguro y que el almacenamiento es a largo plazo, los resultados de la mineralización se observaron en corto tiempo, y no en cientos o miles de años que toma el proceso en forma natural. Este proceso se ha reducido a dos años, al igual el riesgo de fuga disminuye considerablemente por el mecanismo de atrapamiento involucrado. Los proyectos en el mundo acerca del almacenamiento de CO₂ en basaltos, empezaron a surgir a partir del proyecto CarbFix, como en Estados Unidos e India, de los que se hablará en el siguiente capítulo del presente trabajo.

El almacenamiento por mineralización en basaltos se puede definir como la inyección de CO₂ ó de CO₂ disuelto en agua, que reaccionará con cationes metálicos divalentes como el Ca²⁺, Mg²⁺, y Fe²⁺, los cuales formarán carbonatos estables como calcita, dolomita, magnesita y siderita. El CO₂ disuelto en agua acelera el proceso de mineralización a dos años, en cambio, un proceso de mineralización con solo CO₂ dura cientos de años.

Existen dos tipos de procesos principales en los que se puede clasificar, la *carbonatación in situ*, y *ex situ*; la primera consiste en que el lugar de inyección en el subsuelo es donde ocurre la mineralización del CO₂; la carbonatación *ex situ*, se refiere a la mineralización ocurre en la superficie, siendo un proceso industrial (Gislason, S.R., et al., 2010); el tipo de almacenamiento que se ha llevado a cabo en los grandes proyectos es la carbonatación *in situ*, debido a una mayor viabilidad en costos y seguridad del proceso.

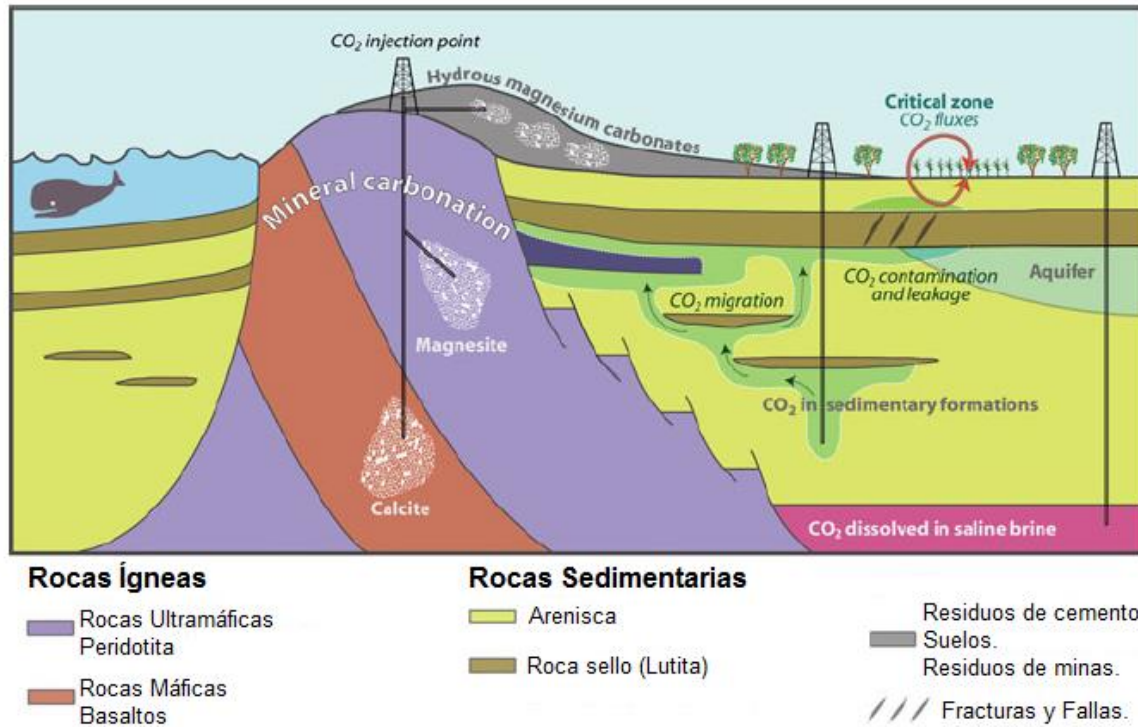
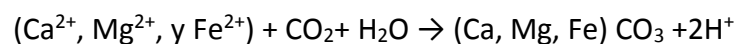


Fig. 2.5. Esquema de inyección en basaltos y formación de calcita (García del Real, P., et. al., 2016).

La inyección de CO₂ en basaltos representa más ventajas que en otros medios de almacenamiento, como el almacenamiento permanente por mineralización y gran volumen que puede llegar a almacenar.

El CO₂ puede ser inyectado de dos formas distintas, la primera es cuando el CO₂ se inyecta sin previa disolución, cuando el CO₂ se inyecta se necesita de una capa impermeable para evitar fugas, el CO₂ se va atrapando en los poros del basalto y con el tiempo éste se va disolviendo en el basalto, para posteriormente formar minerales de carbonato estables; la segunda se probó por primera vez en el proyecto CarbFix, donde el CO₂ se disuelve en agua previamente, al disolverse se evita que el CO₂ pueda fugarse, y favorece la liberación de cationes divalentes, la mezcla resultante es inyectada en el basalto, formando carbonatos. La reacción general y simplificada de este proceso es la siguiente:



Aunque en esta reacción principalmente se forman carbonatos, se ha comprobado la formación de minerales secundarios como arcillas, óxidos metálicos, entre otros, los minerales secundarios representan un problema en el proceso de formación de carbonatos, ya que estos pueden llegar a impedir que el proceso de mineralización se complete.

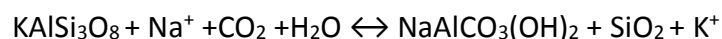
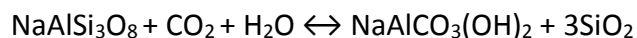
Los parámetros a tener en cuenta para la selección e inyección en el sitio de almacenamiento de CO₂ en basaltos son:

- Profundidades igual o mayor a 800 m para garantizar la seguridad del almacenamiento. Se han llegado a probar con profundidades de 500 m (Gislason, et al., 2014).
- Porosidad y permeabilidad suficientes. - No se han determinado valores mínimos, aunque en Islandia el promedio en los basaltos es de 9% de porosidad, la permeabilidad generalmente es baja, llegando a ser impermeable.
- Temperatura. - Es un factor importante para que ocurra la mineralización, los carbonatos solo tienen una estabilidad hasta los 300 °C aproximadamente, si se rebasa esa temperatura los carbonatos ya no se formarán, la temperatura de inyección es entre 30-50°C. Al aumentar la temperatura, la solubilidad del CO₂ decrece (Al-Anezi, et al., 2008).
- Presión. - Es un parámetro que afecta a liberación de los cationes que reaccionan con el CO₂, si la presión es mayor, la liberación de cationes es mayor y es más probable que se formen carbonatos a otros minerales secundarios que afectan el proceso de mineralización (Snæbjörnsdóttir, S.O, et al., 2014).
- La salinidad del fluido del depósito no afecta la solubilidad que tendrá el CO₂, aunque se tiene que contemplar los compuestos que se llegan a formar las sales que contiene el agua.
- Pocas fallas y fracturas.
- Estabilidad tectónica que evite que se puedan formar nuevas fallas o fracturas que pongan en riesgo el almacenamiento seguro del CO₂.

Un aspecto importante en la inyección de CO₂ en basaltos es la cantidad de agua que se necesita para disolver el CO₂. Para lograr disolver una tonelada de CO₂ a una presión de 25 bares y 25°C, se necesitan 27 toneladas de agua pura; la cantidad de agua que tiene que ser usada es grande, y se ha planteado la posibilidad de ocupar agua marina para la inyección. En el proyecto CarbFix 2, una de las líneas de investigación es la realización de la inyección de CO₂ con agua marina.

En la Fig. 2.6 se muestran dos secciones de basalto alterado de la zona de Islandia. La imagen de la izquierda muestra un reemplazamiento de piroxeno por calcita, clorita, albita y feldespato potásico; en la imagen de la derecha se observa la alteración del basalto por calcita, clorita y albita, predominantemente, al igual que la porosidad es mayor en la imagen de la izquierda; esto nos muestra el proceso que ocurre a nivel microscópico y que en Islandia ya se han formado carbonatos a partir de CO₂.

Algunas reacciones de alteración de silicatos son las siguientes:



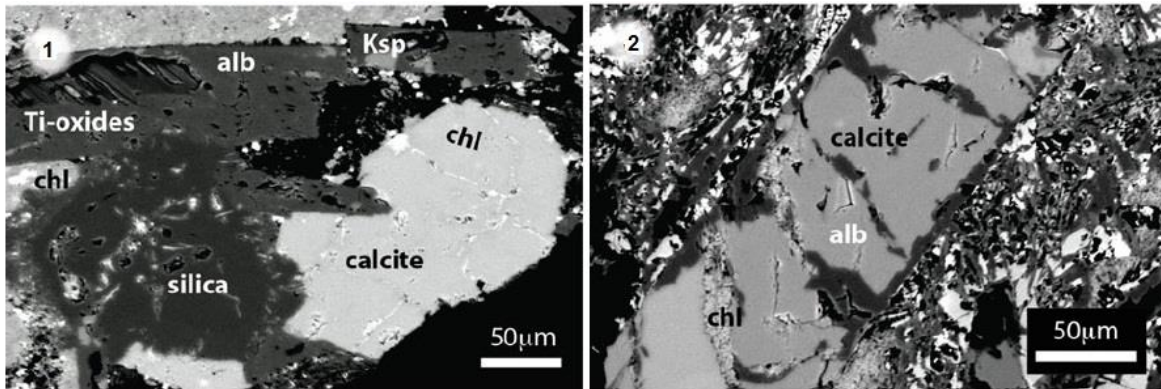
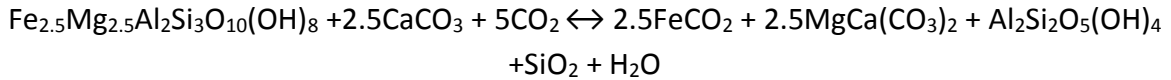


Fig. 2.6. Secciones de basalto alterado de la zona de Islandia, observadas en microscopio electrónico de barrido, Universidad de Stanford. (García del Real, P., et. al., 2016)

Las rocas basálticas constituyen el 10% de la superficie continental, los países con mayor volumen de basalto, que pueden presentar un gran potencial para realizar el almacenamiento de CO₂ (algunos de ellos ya tienen proyectos en desarrollo) son: Estados Unidos (Basaltos del Río Columbia), Islandia, Australia, Indonesia, India (Provincia del Deccan), Namibia, Angola (Provincia Etendeka) y México (Faja Volcánica Transmexicana y Sierra Madre Occidental), principalmente.

Tabla 1. Resumen de capacidades de almacenamiento por opciones de almacenamiento en el mundo (Según Vishal, et al., 2016).

Tipo de Almacenamiento	Mínima capacidad de almacenamiento (Gt CO ₂)	Máxima capacidad de almacenamiento (Gt CO ₂)
Oceánico	1x10 ⁻⁹ por hora	S/D
Yacimientos agotados de petróleo y gas	675	900
Acuíferos Salinos Profundos	1000	400-10,000
Capas de Carbón	3-15	200
Basaltos	S/D	1,000,000

*S/D: Sin Datos.

Referencias.

Al-Anezi, K., Somerfield, C., Mee, D., Hidal, N. (2008). Parameters affecting the solubility of carbon dioxide in seawater at the conditions encountered in MSF desalination plants. *Desalination*, 222, 548-571.

Solomon, S., Flach, T. (2010). Carbon Dioxide (CO₂) Capture, Transport and Industrial Applications. En M. Mercedes Maroto-Valer (Eds.), *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology* (pp. 435-466). United Kingdom: Woodhead Publishing.

CNH. (2012). El futuro de la producción de aceite en México: Recuperación Mejorada y Avanzada.

Ettehadtavakkol, A., (2016). Storage of CO₂ in depleted/producing oil reservoirs. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 185-207). Suiza: Springer.

García del Real, P., Vishal, V. (2016). Mineral Carbonation in ultramafic and basaltic rocks. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 213-225). Suiza: Springer.

Gislason, S.R., Wolff, D., Stefansson, A., Oelkers, E.H., Gunnlaugsson, E., Sigurdardottir, H.I., Sigfusson, B., Broecker, W.S., Matter, J.M., Stute, M., Axelsson, G., Fridriksson, T. (2010). Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 537-545.

Gislason, S.R., Broecker, W.S., Gunnlaugsson, E., Snæbjörnsdóttir, S.O., Mesfin, K.G., Alfredsson, H.A., Aradóttir, E.S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Stute, M., Matter, J.M., Arnarson, M.Th., Galeczka, I.M., Gudbrandsson, S., Stockman, G., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Ragnheidardottir, E., Flaathen, T., Gysi, A.P., Olssen, J., Didriksen, K., Stipp, S., Menez, B., Oelkers, E.H. (2014). Rapid solubility and mineral storage of CO₂ in basalt. *Energy Procedia*, 63, 4561-4574.

IPCC. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono.

Jain, N., Srivastava, A., Singh, T.N. (2016). Carbon Capture, Transport and Geologic Storage: A Brief Introduction. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 3-17). Suiza: Springer.

Jones, K.B, Blondes, M.S. (2015), Carbon Dioxide Storage in Unconventional Reservoirs. USGS.

Lackner KS, Wendt CH, Butt DP, Joyce EL, Sharp DH. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy* 20(11):1153–1170

Pashin, J. (2016). Geological Consideration for CO₂ Storage in Coal. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 138-152). Suiza: Springer.

Prasad, N.T., Murthy, K.N.V.V., Muddada, S., Sadhu, S., Dharani, G., Ramesh, S., Phani, S.V.S., Venkata, M.B., Syamsundar, A., Atmanad, M.A. (2016). Ocean Applications for Carbon Dioxide Sequestration. En V. Vishal y T.N. Singh (Eds.), *Geological Carbon Sequestration* (pp. 231-242). Suiza: Springer.

Ramírez Reyes, R. (2011). *Almacenamiento Geológico de CO₂* (Tesis licenciatura para obtener título de Ingeniero Petrolero). Facultad de Ingeniería, UNAM.

Seifritz, W. (1990). CO₂ disposal by means of silicates. *Nature*, 345, 486.

Shang, H., Wang, W., Duan, P., Yu, J. (2011). A overview on geological storage of CO₂.

Snæbjörnsdóttir, S.O., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármansson, H., Einarsson, G.M., Gislason, S.R. (2014). CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63, 4585 – 4600.

Vishal, V., Singh, T.N. (2016). *Geological Carbon Sequestration*. Suiza: Springer. (pp. 47-56).

Capítulo 3.

Experiencia Internacional en Almacenamiento de CO₂ en Basaltos

Hace más de tres décadas se han llevado a cabo proyectos de almacenamiento geológico de CO₂ en todo el mundo; el primer proyecto a gran escala de almacenamiento de CO₂, se realiza desde 1996 en el campo de gas Sleipner en el Mar del Norte, donde se inyecta CO₂ en formaciones salinas; posteriormente iniciaron proyectos en Weyburn, Canadá, e In Salah, en Argelia; siendo los de mayor importancia por su escala y enseñanza para proyectos posteriores. La mayoría de los proyectos de almacenamiento de CO₂ que se han llevado a cabo son para recuperación mejorada o en formaciones salinas, por lo que se han realizado investigaciones para encontrar otros depósitos de almacenamiento geológico alternativos.

Los proyectos de almacenamiento de CO₂ en basaltos son pocos, debido a que se ha dedicado más inversión e investigación a lo que es económicamente más rentable, como la recuperación mejorada de aceite y/o gas (EOR-EGR), en años recientes se tiene gran interés en el almacenamiento en basaltos, por su gran capacidad de almacenamiento frente a las emisiones de CO₂ de combustibles fósiles a la atmósfera, siendo un almacenamiento seguro y a largo plazo con las condiciones apropiadas.

A gran escala los proyectos que se han llevado a cabo en basaltos o se encuentran en fase experimental, son CarbFix, en Islandia, Big Sky cerca de Wallula, en Estados Unidos, y en fase experimental aún sin inyectar CO₂ en la formación objetivo, es en la provincia volcánica del Deccan en India.

Existen algunos otros prospectos de inyección de CO₂ en basaltos en el mundo son: Australia, Indonesia, Namibia y Angola (Provincia Etendeka); en México (Faja Volcánica Transmexicana y Sierra Madre Occidental) se ha iniciado con pruebas de laboratorio, sobre la viabilidad de formación de carbonatos en basaltos superficiales en la zona de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo, resultando viable la mineralización, como lo muestra Cantú (2018) en su trabajo de tesis.

3.1. Proyecto CarbFix, Islandia.

3.1.1. Generalidades.

El proyecto CarbFix inició en 2007, y constituye el primer proyecto en el mundo que involucra el almacenamiento de CO₂ en basaltos; es una colaboración entre la Universidad de Islandia en Reykjavik, el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia en Nueva York y el Centro Nacional de Investigación Científica de la Universidad Paul Sabatier en Toulouse, Francia (Matter, J.M., et al., 2009).

El sitio de inyección se localiza al SW de Islandia, a 3 km al sur de la planta de energía geotérmica Hellisheidi, a 30 km al Este de Reykjavik.

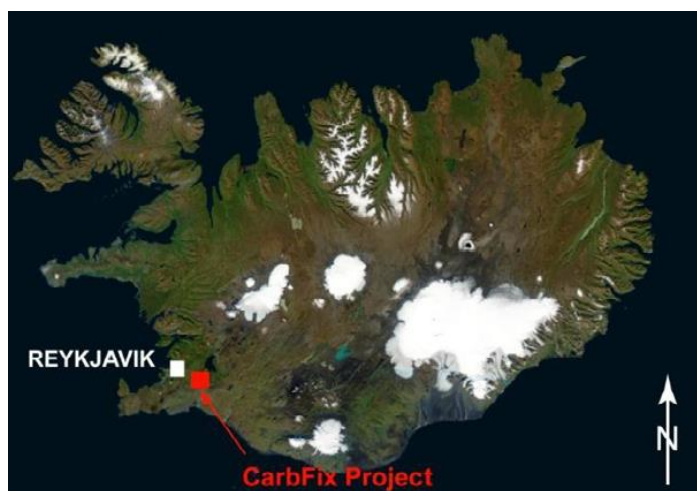


Fig. 3.1. Ubicación del proyecto CarbFix, Islandia (Matter, J.M., et al., 2009).

La planta de Hellisheidi tiene una capacidad instalada de 303 MW en 2013, produjo 40,000 toneladas de CO₂ y 12,000 toneladas de H₂S (Matter, M.J., et al., 2014). Los gases se separan en la planta de tratamiento, donde el H₂S es reinyectado con el agua geotérmica en el pozo de inyección, mientras que el CO₂ es transportado 3 km por una tubería al sitio de inyección.

El proyecto consta de un pozo de inyección de 2,000 m de profundidad, y de 12 pozos de monitoreo a distintas profundidades, entre 150 y 1,300 m. Algunos pozos de monitoreo también fueron equipados como pozos de inyección.

Un primer experimento fue realizado en 2010, en el cual se inyectaron 0.7 kg/s de CO₂ disueltos en 2 kg/s de agua a 19°C en lavas basálticas, esto resultó en el almacenamiento de 2,200 toneladas de CO₂. La inyección en el sitio inició en 2012, en ese año se realizaron dos fases, la primera fue en enero de 2012, se inyectaron 175 toneladas de CO₂ puro junto con 5,000 toneladas de agua a una tasa de inyección de 1.8 kg/s; en la segunda fase se pretendían inyectar 1,200 toneladas de una mezcla de CO₂-H₂S-H₂ por un periodo de 6 meses (Alfredsson, H.A., et al., 2013), únicamente se inyectaron 75 toneladas de

CO₂(75%)–H₂S(24%)–H₂(1%) (Snaebjornsdóttir, S.O. et al., 2017). Al año siguiente, en Julio de 2013 se realizó la inyección de 73 toneladas de CO₂ - H₂S y 2500 toneladas de agua, siendo la última inyección que se realizó en el proyecto CarbFix.

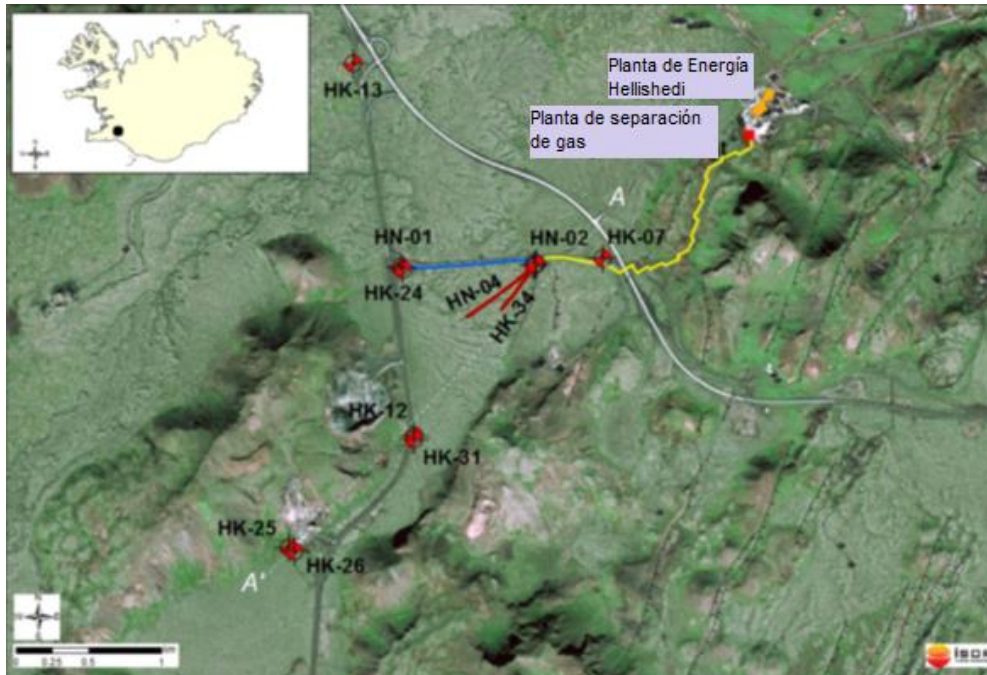


Fig. 3.2. Ubicación de pozos de inyección y monitoreo proyecto CarbFix, pozos HN-01, HN-02, HN-04, HK-34 son de inyección y/o monitoreo profundos, HK-13, HK-24, HK-12, HK-31, HK-25 Y HK-26 son pozos someros de monitoreo (Aradóttir, E.S.P., et al, 2012).

El proyecto CarbFix está enfocado en la mineralización *in situ*, la cual consiste en la inyección de CO₂ en formaciones basálticas, cerca del lugar de emisión de CO₂, en este caso, a 3km de la planta de energía Hellisheidi.

El CO₂ es disuelto en agua durante la inyección, antes de que entre a la roca almacenadora, evitando con este proceso que el CO₂ migre a la superficie. El agua saturada en CO₂ acelera la liberación de los cationes metálicos, los cuales forman carbonatos, como calcita o dolomita, principalmente.

En condiciones atmosféricas, se necesitaron 27 toneladas de agua para disolver una tonelada de CO₂. Snaebjornsdóttir, S.O. (2016) estudió la posibilidad de usar agua de mar en lugar de agua pura para la disolución de CO₂, el promedio es de 20 toneladas de agua de mar con salinidad de 3.5% para disolver una tonelada de CO₂.

Si el agua saturada en CO₂ acelera la liberación de los cationes, la velocidad de la mineralización en la roca aumenta. La formación de carbonatos se limita a 290°C y menos de 1000-1500 m de profundidad (Snaebjornsdóttir, S.O., et al., 2014).

3.1.2. Marco Geológico.

Islandia es conocida por ser una de las regiones volcánicas más activas y productivas del planeta, con una tasa de producción de magma de más de 5 km³ por siglo. Islandia tiene una extensión aproximada de 1,030,000 km², constituido en un 90% por basaltos, y en menor cantidad por sedimentos jóvenes de 0-20 Ma.

Las formaciones basálticas más jóvenes se encuentran en la zona de *rift* activo y zonas transformantes con velocidad de 18-20 mm/año, consisten en lavas porosas, hialoclastitas y sedimentos menores a 0.8 Ma, lo que las hace las más viables para almacenamiento de CO₂.

Se han muestreado y se han analizado rocas ígneas frescas y alteradas, mismas que muestran una composición variable: permeabilidad de 367 mD (miliDarcys), porosidad media de 8.09%; aunque la porosidad aumenta en las rocas frescas siendo de 27.8%, y en las rocas alteradas baja a un 6.13%. En la región de Islandia se muestra la intercalación de rocas ígneas con hialoclastitas, estas últimas siendo rocas mayores a 2.5 Ma, muestran gran heterogeneidad y variaciones amplias en porosidad y permeabilidad, la porosidad variaba entre 14 y 57%, y la permeabilidad entre 1x10⁻³ mD a 6.4x10⁻³ mD (Snaebjornsdóttir, S.O. et al, 2014).

En las formaciones más jóvenes de Islandia, la porosidad y permeabilidad aumentan; a mayor profundidad, alteración y edad, la porosidad y permeabilidad disminuyen llegando a ser rocas casi impermeables.

3.1.2.1. Descripción del sitio.

El proyecto CarbFix se desarrolla en la planta de energía geotérmica Hellisheidi, cerca de la ciudad de Reykjavik, está localizado sobre un punto triple entre la zona volcánica de la península de Reykjanes, la zona volcánica oeste y zona sísmica del sur de Islandia.

El sitio de inyección se sitúa en el flanco oeste del volcán central Hengill, con rocas de 400,000 años; la formación de inyección se encuentra a 400–800 m de profundidad donde las rocas son basaltos toleíticos y son tanto vítreas como cristalinas, se encuentran intercaladas con hialoclastitas; los minerales principales en las rocas volcánicas son plagioclasas, olivino con inclusiones de Cr–espinela, clinopiroxeno (comúnmente augita), magnetita-ilmenita y vidrio intersticial. La porosidad varía entre 5 y 40%; los basaltos alterados presentan esmectita, y existe una precipitación de zeolita, la porosidad disminuye de 1 a 10 %.

Las hialoclastitas son rocas de baja permeabilidad formadas bajo el hielo y aguanieve durante glaciaciones que sirven como roca sello en el sitio de inyección, tienen una porosidad por arriba del 60% y son reactivas, en algunas partes del sitio llegan a presentar

palagonitización, se distingue por la presencia de alteración y criptocristalización amorfa sobre la superficie, la alteración son esmectitas y zeolitas (Alfredsson, H.A., 2013).

Así como existe una intercalación de hialoclastitas y basaltos, en el sitio de inyección se distingue el acuífero principal a 530 m de profundidad, donde las hialoclastitas son las que separan el acuífero de los basaltos debido a una menor permeabilidad.

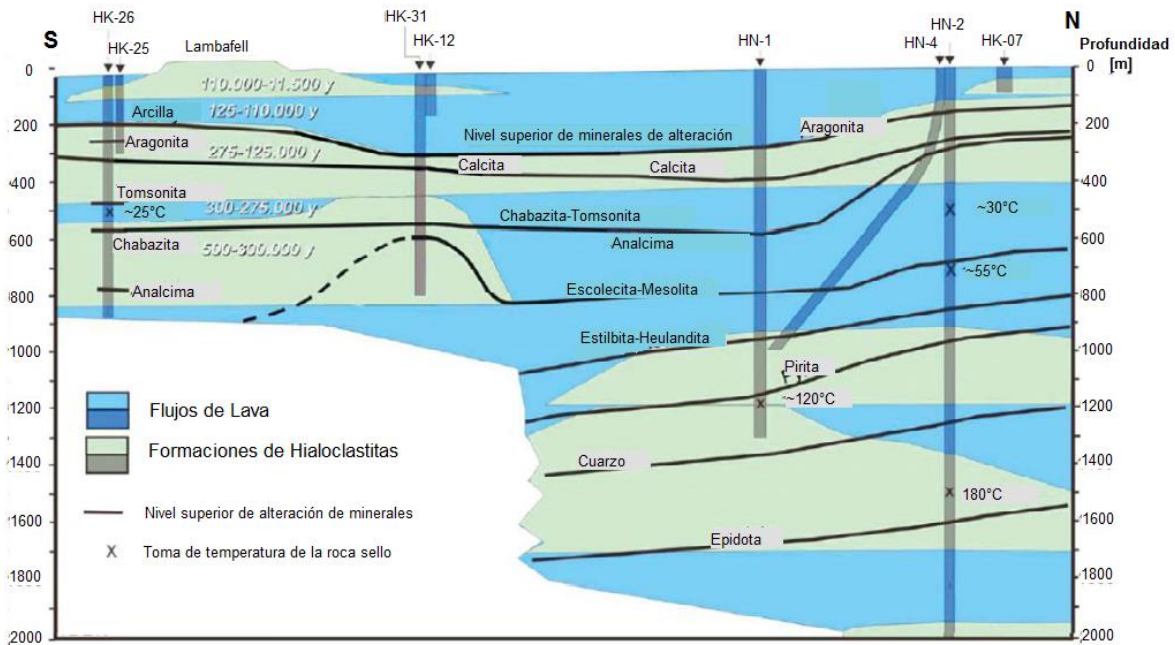


Fig. 3.3. Sección S-N, muestra la disposición de los flujos basálticos y las hialoclastitas, así como las zonas de alteración y pozos de inyección y monitoreo. (Matter, J.M., et al, 2009).

En el sitio de inyección, la temperatura está entre 30 y 50 °C, el agua del acuífero superficial se encuentra a 8–12°C, con un pH entre 7.7 y 8.4, una presión cercana a la atmosférica, y está bajo saturado en calcita. El acuífero a más de 400 m de profundidad, tiene una temperatura entre 18–33°C y es pobre en oxígeno, con un pH entre 8.4 y 9.4, la presión parcial es por arriba de la presión atmosférica, el agua está saturada en calcita.

La zona objetivo tiene más de 2 km de largo, 1,000 m de ancho y 500 m de espesor, esto es por lo menos un kilómetro cúbico de basalto, si se tiene una porosidad de 10%, se obtiene un volumen de 0.01 km³ para que precipite calcita, por lo tanto, el almacenamiento llega a ser de aproximadamente 12 millones de toneladas de CO₂.

3.1.3. Monitoreo.

Posterior a la inyección es necesario monitorear el sitio para que se garantice que el CO₂ se mantenga en el lugar de almacenamiento; en el proyecto CarbFix se instalaron 12 pozos de monitoreo que se encuentran entre los 150 y 1300 m de profundidad.

Después de la primera inyección se inició el monitoreo, en este proyecto se desarrollaron nuevas técnicas para el monitoreo ya que las técnicas que existían como estudios sísmicos y electromagnéticos no eran suficientes para caracterizar la solubilidad del CO₂ y por lo tanto su captura mineral en el depósito geológico.

Las muestras de fluido y gas se han obtenido de los pozos de observación; antes, durante y después de la inyección; las primeras muestras analizadas se utilizaron para definir los valores base y a partir de ahí conocer el comportamiento que ha tenido el CO₂ con la roca.

El monitoreo se ha realizado usando técnicas geoquímicas como un trazador reactivo (¹⁴C), éste sirve para monitorear la reactividad del CO₂ con los fluidos del sitio de inyección. El propósito principal de la inyección de ¹⁴C fue lograr distinguir el CO₂ que se inyectó y el carbón natural del sitio de almacenamiento, y así caracterizar la reacción del CO₂, el fluido y el basalto.

Matter (2014) explica que la técnica se compone de un trazador reactivo con bajos niveles de ¹⁴C que se combinan con trazadores no reactivos como hexafloruro de azufre (SF₆) y pentafloruro trifloruometil de azufre (SF₅CF₃). Se han llevado dos fases de inyección, en la primera se inyectó SF₆ y ¹⁴C y en la segunda SF₅CF₃ y ¹⁴C, se ha observado un aumento del ¹⁴C y carbón orgánico, esto confirmó que durante la inyección de CO₂ las reacciones minerales son las dominantes.

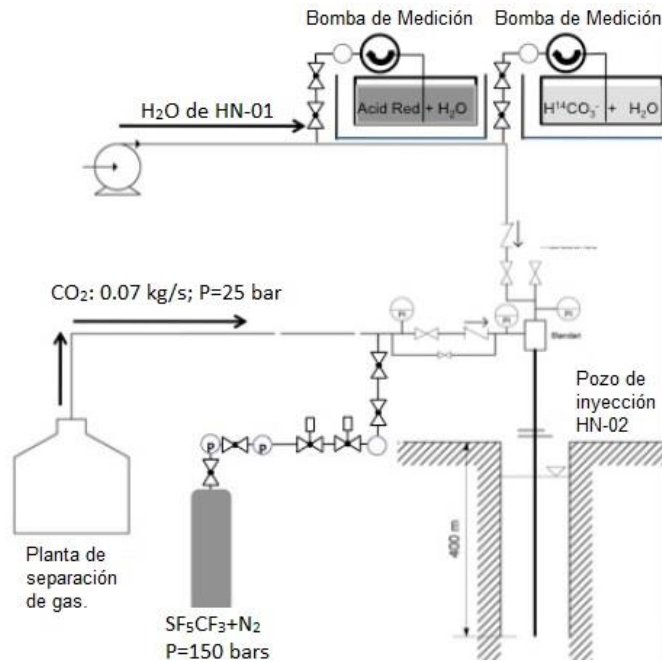


Fig. 3.4. Diagrama del proceso realizado para monitoreo del almacenamiento de CO₂ en el pozo de inyección HN-02 (Matter, J.M, et al, 2011).

El carbón natural del depósito tiene concentraciones bajas de ¹⁴C, durante la precipitación de carbonatos, la fase sólida se enriquece con los isotopos de carbono más pesados (¹³C Y ¹⁴C), mientras que el carbono que se disuelve se vuelve más ligero.

El propósito principal de la inyección de ¹⁴C fue lograr distinguir el CO₂ que se inyectó y el carbón natural del sitio de almacenamiento, y así caracterizar la reacción del CO₂, el fluido y el basalto.

Los resultados arrojaron bajas concentraciones de ¹⁴C, lo que indica que la mayor parte del CO₂ reaccionó con los basaltos.

Después de dos años y medio de la inyección del CO₂ en la formación basáltica se demostró que se formó calcita en el sitio de inyección.

Actualmente se encuentra en proceso el proyecto CarbFix 2, en este proyecto participan Reykjavik Energy, Climeworks, Universidad de Islandia, Amphos 21 y el Centro Nacional de Investigación Científica de la Universidad Paul Sabatier en Toulouse, Francia. Tomando en cuenta el éxito de Carbfix, este proyecto explora otras condiciones y se enfoca en el lecho marino, además se centra en la captura y almacenamiento de CO₂ impuro. Otro de los objetivos es la inyección de CO₂ usando agua marina (CarbFix2, 2018). Actualmente se inyectan 10,000 toneladas de CO₂ y 5,000 toneladas de H₂S en el sitio de CarbFix 2 (University of Edinburgh, 2018).

3.2. Proyecto Big Sky, Wallula, Washigton, Estados Unidos de América.

3.2.1. Generalidades.

A nivel global uno de los países que contribuye en mayor medida a la emisión de CO₂ es Estados Unidos de América, con el 15% total de las emisiones mundiales, solo detrás de China. Aunque en años recientes, E.U.A ha ido reduciendo sus emisiones, aún son mayores a las del resto del mundo, desde 1960 hasta 2014 (Fig. 3.5) las emisiones en su mayoría han aumentado y van más allá de los 5,254,279 kt de CO₂ al año (Banco Mundial, 2015).

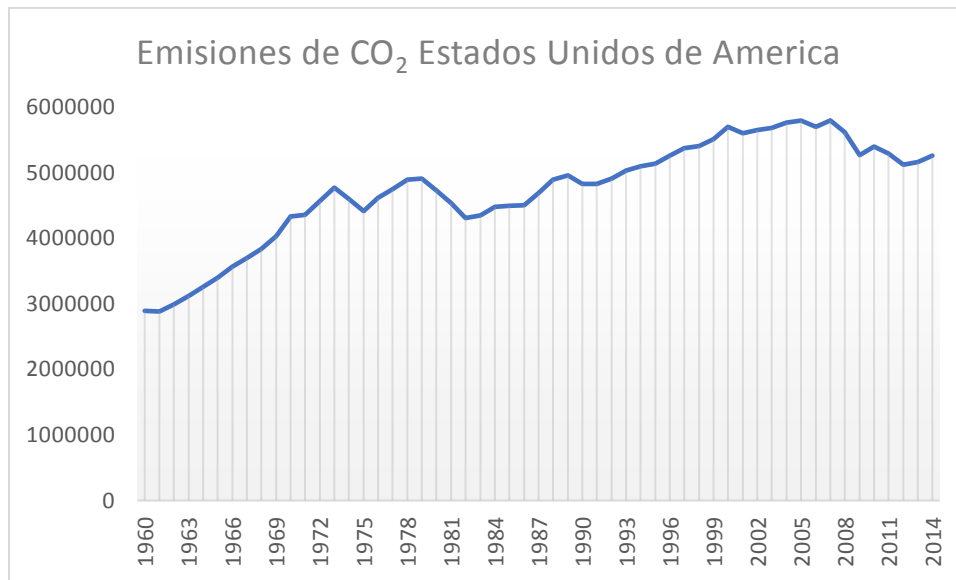


Fig. 3.5. Gráfica de emisiones de CO₂ [Kt] al año 2014 de Estados Unidos de América. Datos obtenidos de banco mundial (Elaboración propia, con datos del banco mundial 2015).

Se han realizado distintas investigaciones donde se involucra la reducción de las emisiones de CO₂, uno de los proyectos involucra la tecnología CCUS, esta tecnología ya ha sido empleada en Estados Unidos con anterioridad como la EOR-EGR en campos de aceite y/o gas en Texas desde la década de los 60; pero en la actualidad se encuentra en proceso el estudio del almacenamiento en basaltos.

En 2007 inicia la búsqueda del sitio para realizar la prueba piloto para el almacenamiento de CO₂ en basaltos, En 2009 se inicia en Estados Unidos la primera perforación (McGrail., et al., 2011) del proyecto de almacenamiento de CO₂ en basaltos continentales en Wallula, al sureste de Washington, los basaltos se encuentran dentro de la provincia de Columbia.

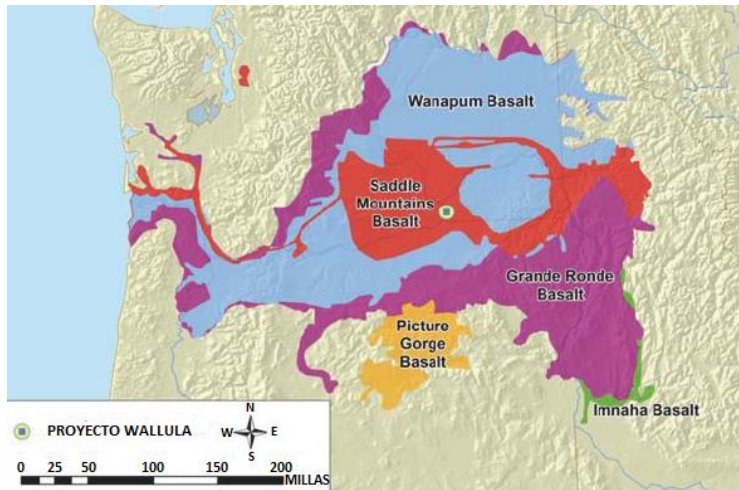


Fig. 3.6. Provincia de Columbia, localización de las formaciones basálticas, potenciales en el almacenamiento de CO₂ (McGrail, B.P., et. al., 2011).

La perforación del pozo de inyección inició en 2009 y llegó a una profundidad de 1253 m, el cual atraviesa tres zonas de brecha basáltica, a profundidades de 828 m y 887 m.

La inyección de 1,000 t de CO₂ se completó en 2013, se inyectaron por un periodo de 14 a 30 días; el monitoreo inicio inmediatamente después de la inyección, sin evidencia de migración vertical.

Los basaltos continentales de la Provincia de Columbia cubren un área de 77,200 m², por lo que se estima un almacenamiento de 10 a 50 Gt de CO₂ aproximadamente (Mc Grail, B.P., et. al., 2011).

3.2.2. Marco Geológico.

El área de inyección se encuentra en la Provincia de Columbia, en el grupo de basaltos del río Columbia del Mioceno (CRBG). Por otro lado, al Este de Washington, Noreste de Oregon y Oeste de Idaho, se han identificado alrededor de 300 flujos individuales, con un espesor máximo de 5 km al centro de la cuenca y un volumen de 220,000 km³ (Mc Grail, B.P., et al., 2014).

El sitio se seleccionó con base en registros sísmicos del 2007, donde se mostró que no existían fallas a gran escala en las capas gruesas de basalto; ya en la perforación realizada a una profundidad de 1253 m se confirmó que no existían fallas profundas en las zonas de inyección y almacenamiento, posteriormente se realizaron estudios de registros geofísicos de pozo, seleccionando así las profundidades a las que el CO₂ sería inyectado (Fig. 3.7).

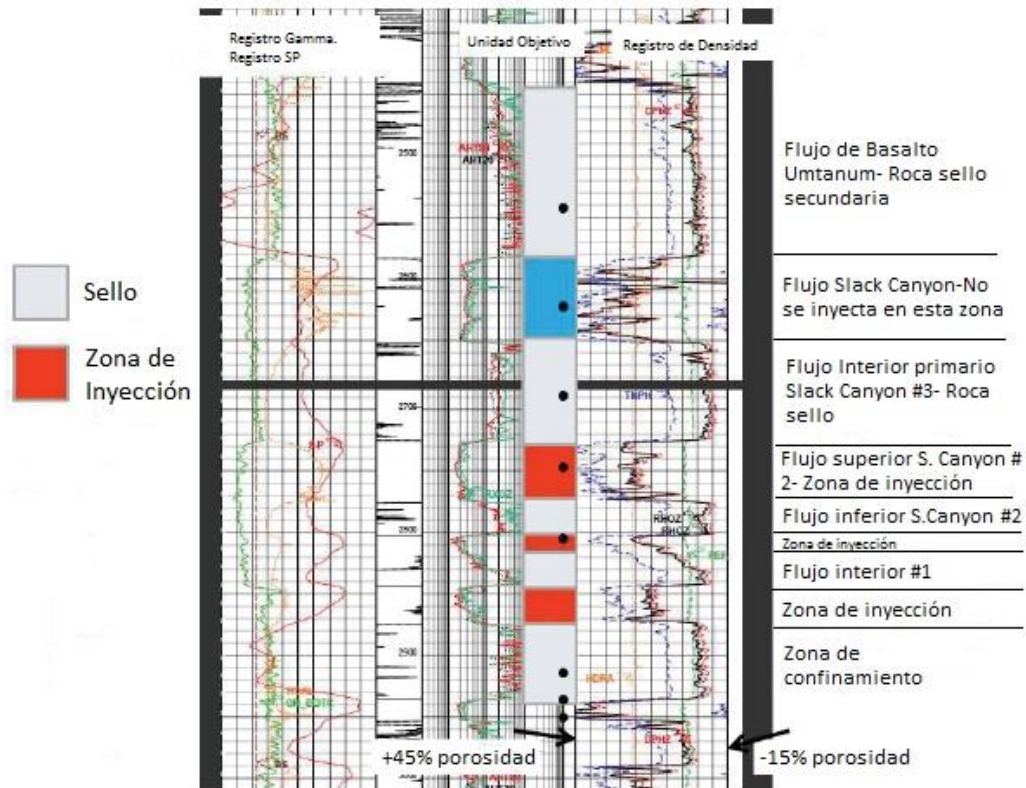


Fig. 3.7. Registro geofísico de pozo realizado por Schlumberger de la formación objetivo, señalando las zonas de inyección (McGrail, B.P., et. al., 2011).

El CRBG se dividió en seis formaciones en orden estratigráfico ascendente: The Imnaha, Grande Ronde, Prineville, Picture Gorge, Wanapam y Saddle Mountains Basalts.

Se realizó un muestreo cada tres metros, con un análisis petrográfico se encontró que los basaltos contienen principalmente plagioclasa, augita y vidrio, como mineral accesorio presenta hematita. En las vetas, fracturas y vesículas están rellenas por calcita y cuarzo; la alteración más común es illita, zeolitas, clinoptilolita y celadonita, mientras que la pirita está presente localmente.

En el sitio de inyección se realizaron pruebas hidrológicas, con el objetivo de caracterizar e identificar una zona de basaltos para su posterior inyección de CO₂, estas pruebas se realizaron en un intervalo de 828 m a 875 m, en las zonas de inyección la porosidad es de 15 a 25%, la porosidad efectiva mayor o igual a 0.1, permeabilidad mayor o igual a 500 mD, la transmisibilidad decrece con el aumento de la profundidad, por lo que se incrementa la formación de minerales secundarios; la transmisibilidad en el sitio es de 9.8 y 19.8 ft²/día, conductividad hidráulica de 0.108 a 0.218 ft/día, permeabilidad intrínseca de 44-90 mD; los valores bajos de permeabilidad sugieren que la roca sello (30 m) es efectiva para aislar el CO₂, por lo que no existe un riesgo de fuga. (Mc Grail, B.P, et. al., 2011).

3.2.3. Monitoreo

El monitoreo inició posterior a la inyección el cual involucró un muestreo a largo plazo del agua subterránea en la zona de inyección, gases del suelo, e imágenes de satélite.

Se observó que existe una disminución de la transmisibilidad a los 792 m, la cual osciló entre 0.01 y 10.76 ft²/día. No existe migración vertical en la cuenca, ya que no se han detectado niveles altos de metano en los basaltos, por lo que el almacenamiento es seguro.

Un año después del inicio de la inyección, se comprobó que el 18% del CO₂ inyectado se ha disuelto. (Mc Grail, B.P., et al., 2014).

En Julio de 2015, el sitio de prueba cerró definitivamente, se realizaron pruebas antes del cierre (recuperación de núcleos, imágenes 3D, estudios geofísicos, y por último pruebas hidrológicas), se realizó una caracterización geoquímica donde concluyeron que en 24 meses el CO₂ se estaba convirtiendo en un mineral carbonatado, mientras las pruebas hidrológicas evaluaban los cambios de permeabilidad en el sitio de inyección (McGrail, et al., 2017).

3.3. Deccan Volcanic Province, India.

3.3.1. Generalidades.

Más del 70% de las emisiones de carbón en India están asociadas con la quema de combustibles fósiles, siendo el tercer país en el mundo con las mayores emisiones de CO₂. Las emisiones están asociadas a las plantas de energía que funcionan principalmente con carbón. Se prevé que hasta 2050 exista una dependencia hacia los combustibles fósiles para producir energía, dejando en segundo plano la energía nuclear, hidrológica y renovable.

Los inversionistas en el sector energético son el gobierno y el sector privado, el primero, invierten en energías renovables como primera opción, ya que se contempla en su política ambiental invertir en CCS, mientras que el sector privado podría invertir en energía solar y CCS a largo plazo (Kapila,R.V, et al., 2011).

En 2013 las emisiones de CO₂ de las plantas de energía fueron 786 Mton, y el almacenamiento estimado por mineralización en basaltos es de 200 Gt de CO₂, por lo que, si las emisiones se siguen dando de la misma forma, el espacio se llenaría en aproximadamente 200 años.

Cada año al aumentar la población en India se crea la necesidad de producir más energía eléctrica, desde 2011 se ha llevado a cabo un proyecto de construcción de nuevas plantas de energía eléctrica, se propusieron nueve plantas con capacidad de 617,339 MW (Yadav, D., et al., 2016). Todas las plantas eléctricas que iniciaron su planeación o construcción

después de 2011 ya tienen integrada la tecnología CCS, esto implica una mayor eficiencia pasando de 35% a 40% para lograr hacer la captura satisfactoriamente, esto permite reducir las emisiones de CO₂ directamente de las plantas eléctricas de India.

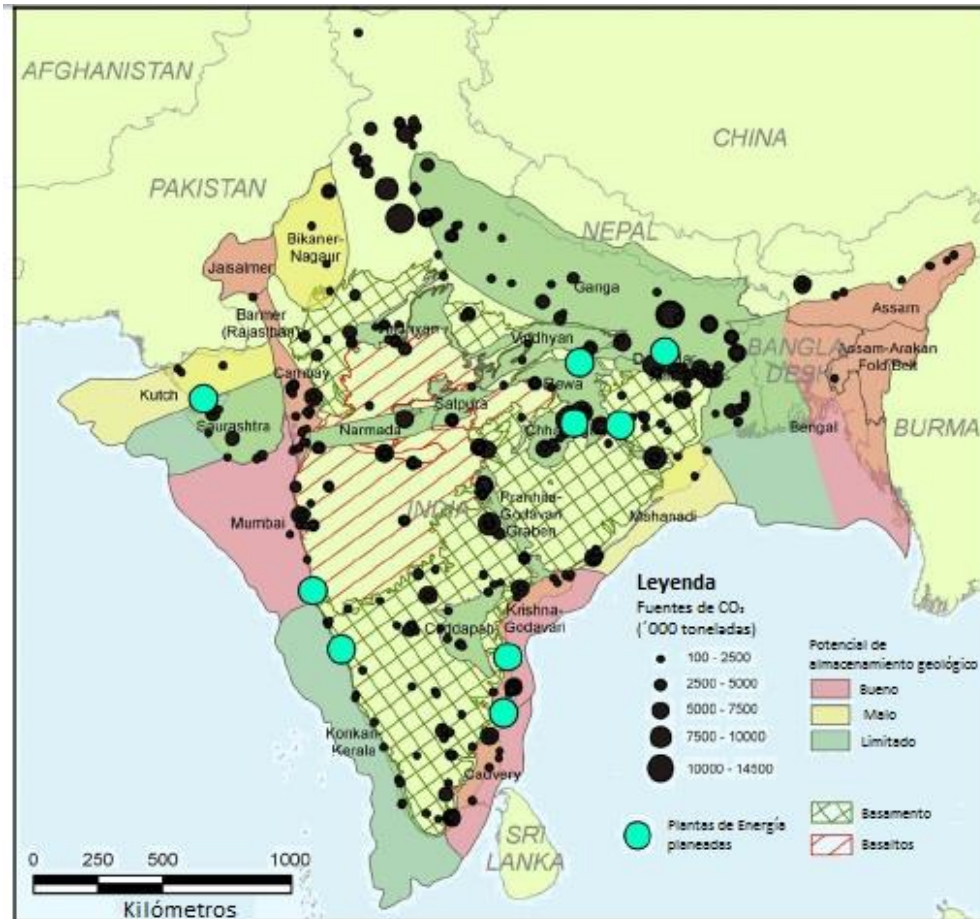


Fig. 3.8. Mapa de India, muestra lugares con las mayores emisiones de CO₂, el potencial de almacenamiento de las cuencas, las plantas eléctricas planeadas donde se integrará el sistema de captura de CO₂, zonas de basaltos de posible almacenamiento por mineralización (Kapila, R.V., et al., 2009).

Los lugares donde existe una mayor emisión de CO₂, están alejados de los lugares de almacenamiento en basaltos, por lo que se dificulta el transporte e implica un mayor costo; por lo tanto, la tecnología CCS se hace económicamente más rentable aplicada a recuperación mejorada de aceite y/o gas (EOR).

3.3.2. Marco Geológico.

En India está en fase experimental el almacenamiento en basaltos, la primera limitación que se encontró fue la falta de información del sitio de almacenamiento.

La región propuesta para el almacenamiento es la Provincia Volcánica del Deccan (DVP), localizada al noroeste de India, donde los basaltos se extienden por un área de 500,000 km².

La provincia volcánica del Deccan se compone de unidades volcánicas félsicas y máficas del Cretácico intercaladas con sedimentos del Mesozoico y Cretácico. Los sedimentos del Mesozoico se encuentran estratigráficamente por debajo de las unidades volcánicas, las últimas, generadas por la erupción a lo largo de *rifts*, siendo más delgadas que los sedimentos del Mesozoico.

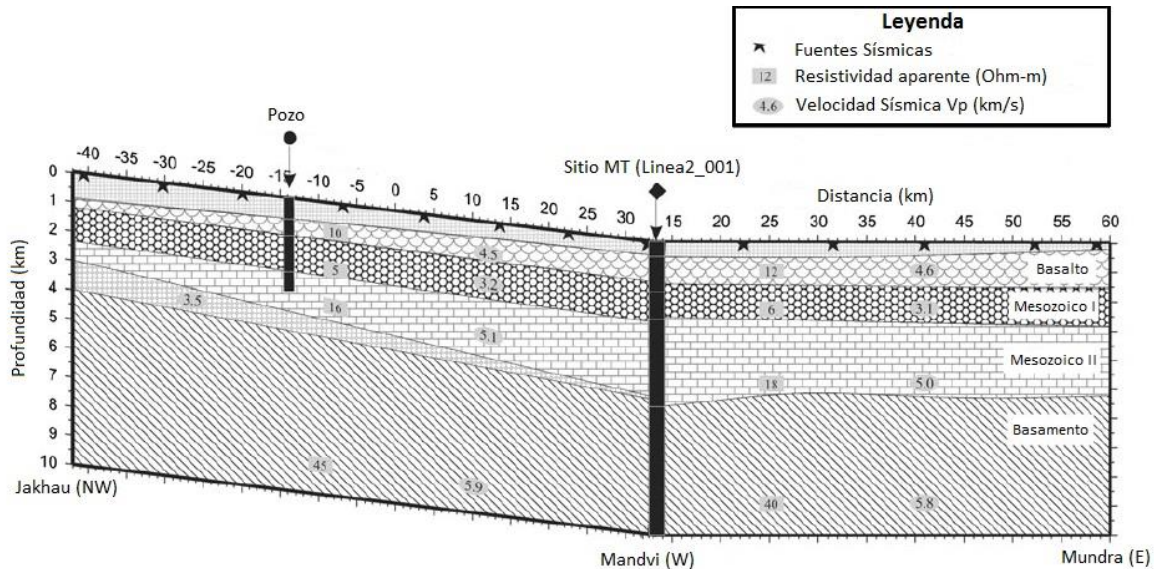


Fig. 3.9. Sección de parte de la provincia volcánica del Deccan, muestra la disposición estratigráfica de las unidades (Pandey, D.K., et al., 2011).

Se han realizado estudios de exploración directa (barrenos) y algunos estudios geofísicos principalmente sísmicos.

La perforación de un barreno llegó a los 617 m de profundidad, se encontraron 338 m de basalto, 8 m de sedimentos y 270 m de basamento cristalino del Arqueano. Respecto a los basaltos se encontraron dos tipos, basaltos de tipo masivo y vesicular, de composición toleítica, los magmas no provienen del manto, sufrieron un enfriamiento rápido, al igual que su salida a la superficie. El 53% de los basaltos son masivos de alta densidad (2.90 g/cm³), el 47% son basaltos no masivos o vesiculares, de baja densidad (2.36 g/cm³) y alta porosidad, estimada en un 20% del total de la roca; los basaltos vesiculares por su alta porosidad son los que se han propuesto para el almacenamiento; las rocas encontradas en la superficie se encuentran altamente deformadas y fracturadas, por lo que no son aptas para el almacenamiento de CO₂ (Pandey, O.P., et al, 2016).

Los estudios geofísicos que se han realizado en la provincia volcánica del Deccan son pocos, aunque en los últimos años la técnica que se ha usado es la reflexión sísmica, esta técnica

ha servido para conocer cuál es la disposición de las unidades volcánicas respecto a los sedimentos y donde se presenta el potencial de almacenamiento. Los basaltos tienen un espesor promedio de 0.2-1.2 km, con velocidades de onda sísmica altas de 4.3 a 5.2 km/s, con resistividades de 10-12 Ω. La capa superior referente a los sedimentos cuenta con un espesor de 0.2-0.5 km, con velocidades de onda sísmicas bajas, siendo de 1.9-2.0 km/s (Pandey, D.K., et al, 2011).

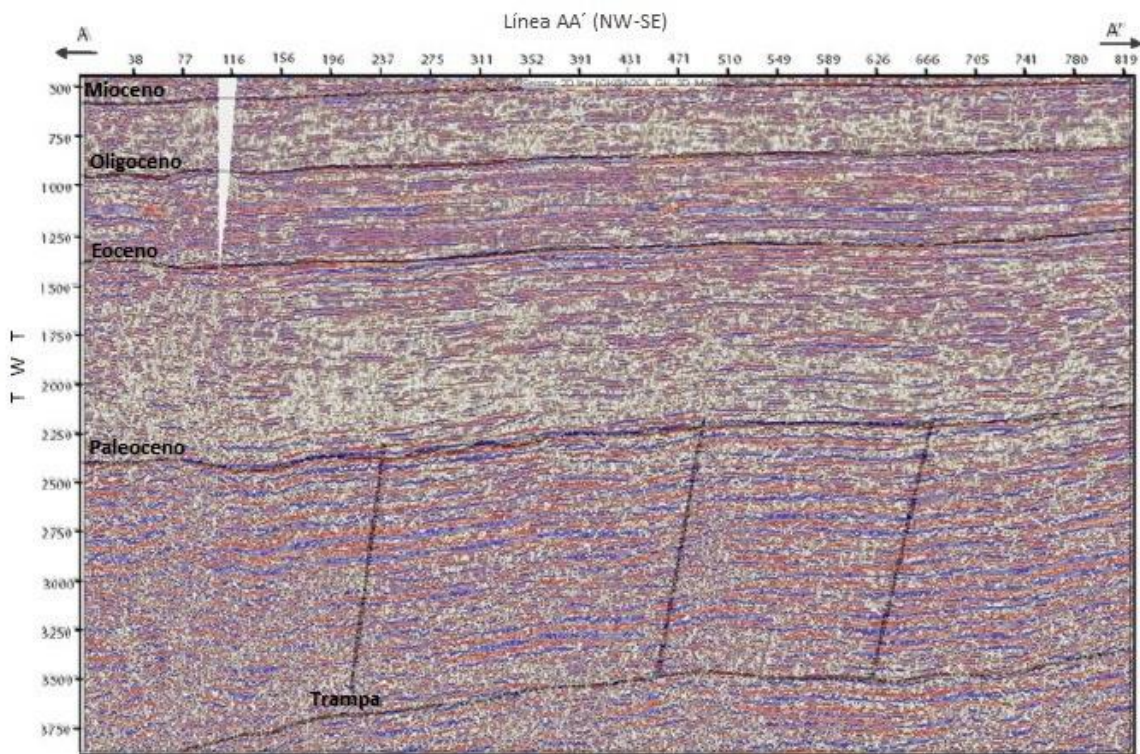


Fig. 3.10. Sección sísmica NW-SE, de una sección de la provincia volcánica del Deccan, observando la disposición de sedimentos y trampa (Pandey, D.K., et al., 2011).

Aún no existen datos acerca de inyección de CO₂ en India, sólo se ha estudiado la posibilidad y potencial que tienen los basaltos de la provincia del Deccan, la inversión que se prevé proviene de la industria privada, la cual ha sido la más interesada en el tema.

Los tres proyectos a mayor escala en almacenamiento de CO₂ en basaltos en el mundo, en especial CarbFix, en Islandia, que representa un precedente de éxito, han sentado una buena base de sitios para almacenamiento geológico de CO₂ no convencionales.

Referencias.

Alfredsson, H.A., Oelkers, E.H., Hardarsson, B.S., Franzson, H., Gunnlaugsson, E., Gislason, S.R. (2013). The geology and water chemistry of the Hellisheidi, SW-Iceland carbon storage site. *Greenhouse Gas Control*, 12, 399-418.

Aradóttir, E.S.P., Sonnenthal, E.L., Björnsson, G., Jónsson, H. (2012). Multidimensional reactive transport modeling of CO₂ mineral sequestration in basalts at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *Greenhouse Gas Control*, 9, 24-40.

Cantú-Apodaca, E. (2018). *Análisis de la Factibilidad para la Eliminación Dióxido de Carbono Mediante la Formación de Carbonatos a través de Basaltos* (Tesis licenciatura para obtener título de Ingeniero Petrolero). Facultad de Ingeniería, UNAM.

CarbFix (2018). CarbFix2. Recuperado de <https://www.carbfix.com/carbfix2>.

Kapila, R.V., Haszeldine, R.S. (2009). Opportunities in India for Carbon Capture and Storage as a form of climate change mitigation. *Energy Procedia*, 1, 4527-4534.

Kapila, R.V., Chalmers, H., Haszeldine, S., Leach, M. (2011). CCS prospects in India: results from an expert stakeholder survey. *Energy Procedia*, 4, 6280-6287.

Matter, J.M., Broecker, W.S., Stute, M., Gislason, S.R., Oelkers, E.H., Stefánsson, A., Wolff-Boenisch, D., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Björnsson, G. (2009). Permanent Carbon Dioxide Storage into basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland. *Energy Procedia*, 1, 3541-3646.

Matter, M.J., Stute, M., Hall, J., Mesfine, K., Snæbjörnsdóttir, S.O., Gislason, S.R., Oelkers, E.H., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Aradóttir, E.S., Alfredsson, H.A., Gunnlaugsson, E., Broecker, W.S. (2014). Monitoring permanent CO₂ storage by in situ mineral carbonation using a reactive tracer technique. *Energy Procedia*, 63, 4180-4185.

Mc Grail, B.P., Spane, F.A., Amonette, J.E., Thompson, C.R., Brown, C.F. (2014). Injection and Monitoring at the Wallula Basalt Pilot Project. *Energy Procedia*, 63, 2939-2948.

McGrail, B.P., Schaef, H.T., Spane, F.A., Horner, J.A., Owen, A.T., Cliff, J.B., Qafoku, O., Thompson, C.J., Sullivan, E.C. (2017). Wallula Basalt Pilot Demonstration Project: Post-Injection Results and Conclusions. *Energy Procedia*, 114, 5783-5790.

McGrail, B.P., Spane, F.A., Sullivan, E.C., Bacon, D.H., Hund, G. (2011). The Wallula Basalt Sequestration Pilot Project. *Energy Procedia*, 4, 5653-5660.

Pandey, D.K., Pandey, A., Rajan, S. (2011). Offshore Extension of Deccan Traps in Kachchh, Central Western India: Implications for Geological Sequestration Studies. *Natural Resources Research*, 20, 33-43.

Pandey, O.P., Vedanti, N., Ganguli, S.S. (2016). Some Insights into Possible CO₂ Sequestration in Subsurface Formations beneath Deccan Volcanic Province of India. The journal of Indian Geophysical Union: CO₂ injection for EOR & Geological Sequestration, 1, 20-25.

Snæbjörnsdóttir, S.O., Gislason, S.R. (2016). CO₂ storage potential of basaltic rocks offshore Iceland. Energy Procedia, 86, 371-380.

Snæbjörnsdóttir, S.O., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármannsson, H., Einarsson, G.M., Gislason, S.R. (2014). CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. Energy Procedia, 63, 4585-4600.

Snæbjörnsdóttir, S.O., Oelkers, E.H., Mesfin, K., Aradóttir, E.S.P., Dideriksen, K., Gunnarsson, I., Gunnlaugsson, E., Matter, J.M., Stute, M., Gislason, S.R. (2017). The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the *in situ* mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland. Greenhouse gas control, 58, 87-102.

University of Edinburgh (31 de Julio de 2018). GeoSciences delegation visit CarbFix 2 project in Iceland. Recuperado de <https://www.geos.ed.ac.uk/geosciences/about/news/20180731/geosciences-delegation-visit-carbfix-2-project-iceland>

Yadav, D., Chandel, M. K., Kumar, P. (2016). Modeling and Analysis: Suitability of CO₂ capture technologies for carbon capture and storage in India. Greenhouse gases: Science and Technology, 6, 519-530.



Capítulo 4.

Viabilidad de almacenamiento de CO₂ en basaltos en México

El almacenamiento eficiente y seguro de CO₂ en basaltos ha sido comprobado en el mundo. Este tipo de almacenamiento ya es una realidad y se ha empezado, por ejemplo, en Islandia una segunda fase en desarrollo.

Cabe resaltar no todos los sitios que cuentan con basaltos son aptos para el almacenamiento, por lo que los sitios con basaltos deben ser evaluados de manera particular.

En este capítulo se describirán zonas con volúmenes importantes de basaltos en México, y se proponen o descartan lugares de posible almacenamiento de CO₂, con base a espesores, complejidad estructural, estratigrafía, porosidad y permeabilidad.

4.1. Basaltos en México.

En México, las principales provincias que presentan volúmenes importantes de basalto son: la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

En la Sierra Madre Occidental los basaltos fueron producto de un evento magmático del Mioceno-Oligoceno, afectando el área Sureste del Estado de Sonora límite con Chihuahua.

Respecto a la FVTM, los basaltos, se encuentran distribuidos a lo largo de toda la provincia, desde el Oeste en Nayarit hasta el Este en Palma Sola.

A grandes rasgos, los basaltos se localizan en Tepic, y al suroeste de Nayarit en el área del Ceboruco, la mayor parte del estado de Jalisco (Noroeste de Guadalajara, Altos de Jalisco), el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, Querétaro (Secuencia volcánica San Juan del Río, y flujos en caldera Amazcala y Amealco), Hidalgo (Pathé), Tlaxcala y Puebla (región Apan- Acozulco), y por último en el estado de Veracruz en la región del campo volcánico Palma Sola. El evento geológico que les dio origen es conocido como episodio máfico del Mioceno, exceptuando derrames lávicos de Tlaxcala en la zona de Apan con edades del Plioceno a Pleistoceno (García-Palomo, et al., 2018), derrames basálticos interestratificados con ignimbritas, en Laguna Cuitzeo, Presa Solis y Tuxpan, en tanto en Pachuca y Tlanchinol Hidalgo se encuentran secuencias piroclásticas intercalados y cubiertas por lavas basálticas del Plioceno temprano pertenecientes al episodio de vulcanismo silícico y bimodal, por último, el campo volcánico Michoacán-Guanajuato donde el vulcanismo inicio hace aproximadamente 2.8 Ma hasta nuestros días (Gómez-Tuena, et al., 2005).

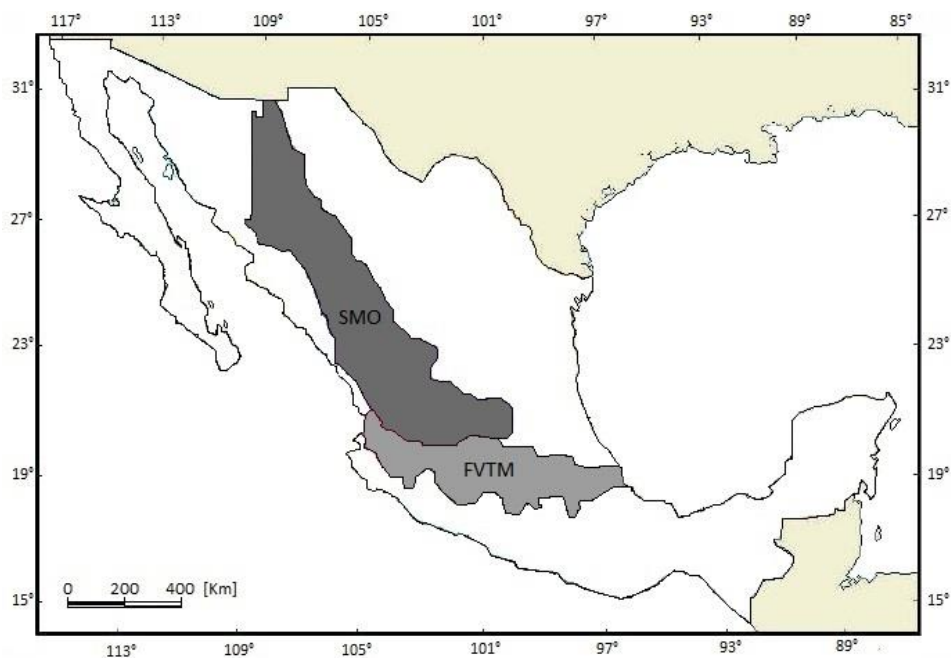


Fig. 4.1. Mapa muestra las dos provincias principales con volúmenes importantes de basaltos. SMO: Sierra Madre Occidental. FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.

4.1.1. Basaltos en la Sierra Madre Occidental.

La Sierra Madre Occidental es principalmente una provincia silícica, que se extiende aproximadamente 1,250 km de longitud y 200 a 500 km de ancho, con un volumen total de 300,000 km³ (Ferrari et al., 2005b), abarcando estados como Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Nayarit y Jalisco. Como se ha mencionado, el 90% consiste en ignimbritas y domos riolíticos, y el 10% restante pertenece a basaltos y andesitas basálticas (Ferrari, et al., 2005b), estos últimos localizados con mayor volumen en el área de Sonora y Chihuahua.

4.1.1.1. Basaltos en Sonora.

El estado de Sonora es uno de los más diversos geológicamente hablando del país, donde es posible encontrar rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; las primeras, de importancia económica en minería, por los pórfidos cupríferos.

Al Este del estado, en los límites con Chihuahua, se encuentra el municipio de Yécora y Nácori Chico (Fig. 4.2.), estos municipios concentran un volumen importante de basaltos, llegando a espesores de 700 a 800 m en promedio. Informes del SGM indican espesores del vulcanismo máfico a bimodal en superficie de 500 a 600 m, las secuencias se pierden y se ha inferido que en el subsuelo continúan los espesores mayores a 500 m, pertenecientes a

un evento magmático del Mioceno-Oligoceno. El volumen total del magmatismo bimodal lo han estimado mayor a 400,000 km³ (Ferrari, et al., 2018).

Los estudios del subsuelo en el área son pocos, los cuales están relacionados con acuíferos. La secuencia estudiada consiste en el paquete sedimentario que se encuentra aproximadamente a 200 m de profundidad. Se conoce que debajo del paquete sedimentario se encuentran las rocas volcánicas, del cual se desconoce el espesor de cada unidad. El espesor total de la secuencia volcánica se estima que puede alcanzar 2,500 m.

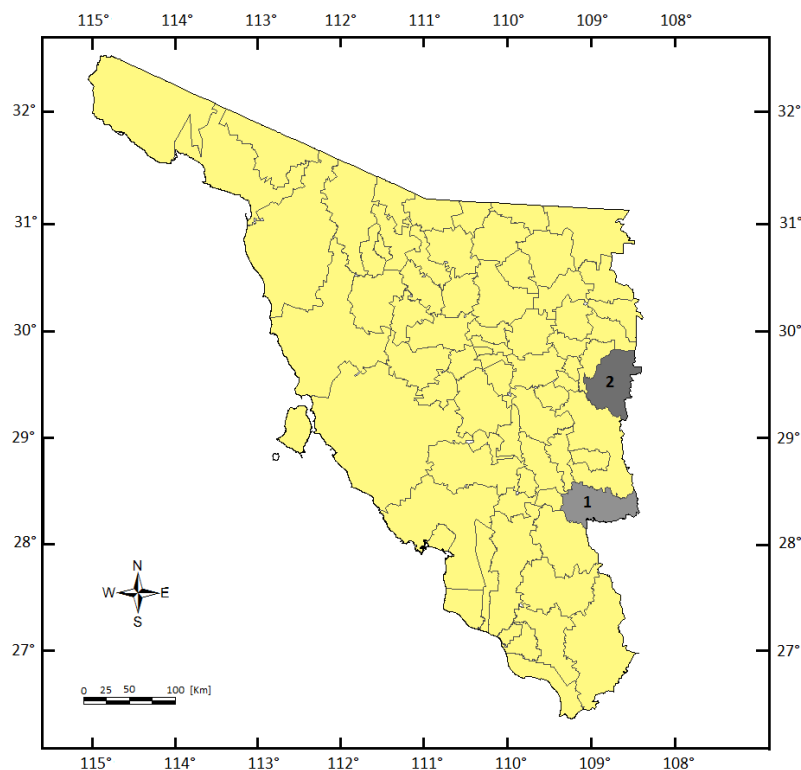


Fig. 4.2. Mapa de Sonora, muestra los municipios con volúmenes importantes de basaltos. 1: Municipio de Yécora. 2: Municipio de Nácori Chico.

4.1.1.1.1. Yécora, Sonora.

Se localiza al sureste del estado de Sonora, dentro de las coordenadas 28° 10' y 28° 39' de latitud, 108° 28' y 110° 08' de longitud. Colinda con el municipio de Sahuaripa al Norte, al oeste con Rosario, Onavas, Soyopa, y Bacanora, al Este y Sur con el estado de Chihuahua.

4.1.1.1.1.1. Geología.

En el área de Yécora se han presentado estudios principalmente orientados hacia el área minera. De los estudios que hablan de los eventos ocurridos que afectaron el área, además de la geología estructural y petrografía principalmente, fueron realizados por Cochemé y

Demant (1991), y el SGM en 1999. Ambos estudios, abarcan áreas de las cartas de Santa Rosa, Yécora y Mulatos del SGM.

Cochemé y Demant propusieron que en el área ocurrieron tres eventos principales, el primero, ocurrió en el Mesozoico (90 a 40 Ma), se trata de una secuencia calcoalcalina caracterizada por granitoides debido a la subducción de la placa del Pacífico bajo la placa Norteamericana, el segundo evento es del Oligoceno-Eoceno (35 Ma). Es una secuencia volcánica de andesitas e ignimbritas, el último evento es una secuencia bimodal del Oligoceno-Mioceno (30 a 17 Ma), consiste en basaltos y andesitas basálticas asociadas con lavas calcoalcalinas y tobas. Estas lavas fueron extruidas por fisuras y pequeñas calderas, con afinidades orogénicas y anorogénicas a través del tiempo, pasando de series calcoalcalinas a toleíticas, este evento se relaciona con la provincia denominada *Basin and Range* (Cuencas y Sierras), los basaltos que se encuentran en la parte central del estado de Sonora son generalmente anorogénicos, afectados por la apertura del Golfo de California.

La secuencia basáltica bimodal del Oligoceno-Mioceno se encuentra formada por tobas, riolitas, dacitas, intercaladas con flujos de basaltos y andesitas basálticas. La mineralogía de estas dos últimas es similar: fenocristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno. Las andesitas basálticas se distinguen por además contener flogopita. Esta secuencia se encuentra expuesta cerca del Rancho La Pinoso con el graben de Rio Pilares-Rio Maicoba (Cochemé, et al., 1991). Esta secuencia conforma extensas sierras, y se estima un espesor de 300 m (secuencia máfica) y en algunos de más de 1,000 m (intercalaciones de basalto-toba riolítica). Parte de la secuencia máfica y bimodal se ve en afloramientos al Sur y Noreste del acuífero de Yécora, no se cuenta con datos concretos que hablen del espesor total en el subsuelo y la profundidad a la que se encontraría el paquete de rocas. La secuencia sobreyace de forma concordante a la secuencia del oligoceno de toba riolítica, y se encuentra cubierto por conglomerados de la Formación Báucarit y basaltos y andesitas basálticas del Mioceno; el fracturamiento y alteración es variable, por lo que la permeabilidad varía de alta a media (CONAGUA, et al., 2009).

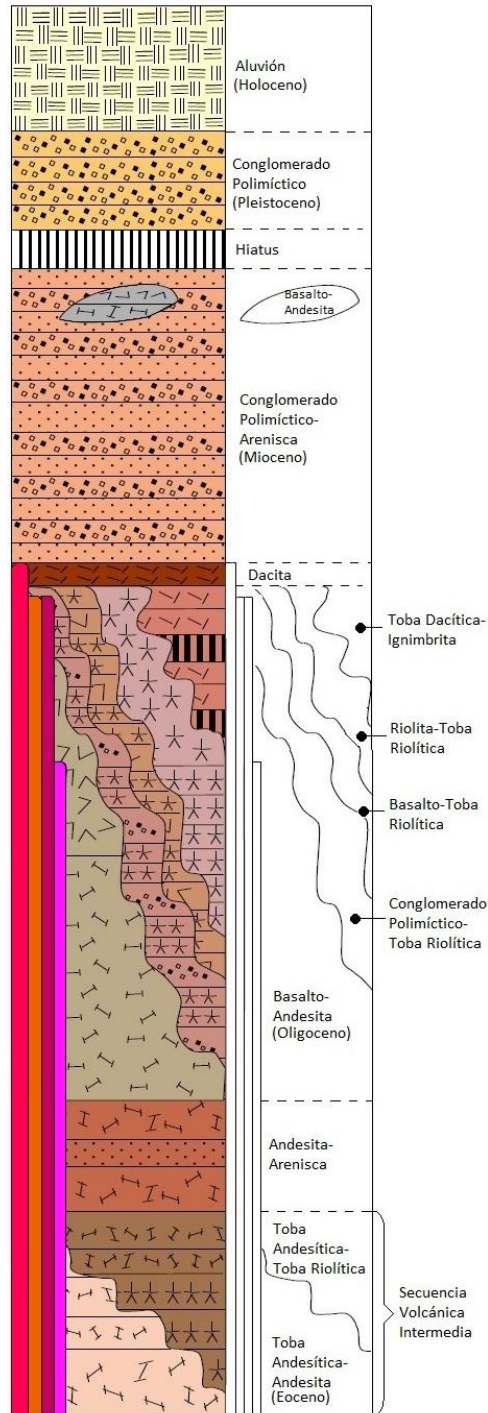


Fig. 4.3. Columna estratigráfica del área en carta Yécora, siendo los basaltos del Oligoceno un volumen importante (SGM, 2007).

Respecto a la geología estructural del área, las rocas volcánicas máficas se encuentran afectadas por la fosa Yécora, la cual está limitada por dos fallas, la falla Yécora y falla San José-Los bueyes. La Falla Yécora es una falla normal con rumbo NW-SE con desplazamiento vertical, con echado de 75° al NE, se pierde bajo la cubierta de basaltos y andesita basáltica

del Mioceno Superior, y pone en contacto las riolitas y tobas con el conglomerado de la Formación Báucarit. La falla San José-Los bueyes es también una falla normal que corta hasta debajo del aluvión del reciente, atraviesa el paquete calcoalcalino involucrando las riolitas y tobas, en los basaltos y andesitas basálticas, han considerado la posibilidad que la falla este en contacto con los basaltos del Oligoceno, ya que este afloramiento está controlado por esta falla, tiene una dirección NW-SE, con longitud aproximada de 6 km y echado de 82° SE (SGM, 2007).

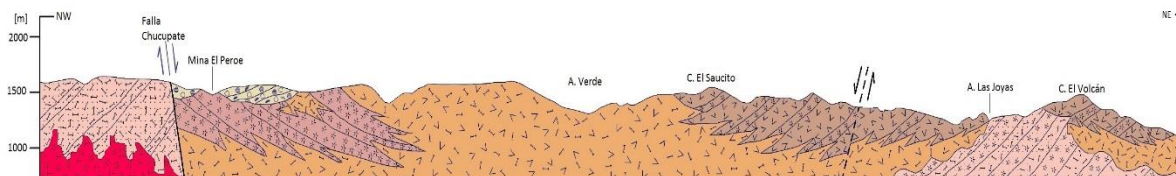


Fig. 4.4. Sección geológica que muestra disposición general de los basaltos en el área de Yécora y como son afectados por fallas normales de la región (SGM, 2008).

4.1.1.1.2. Nácori Chico, Sonora.

Se localiza al Este del Estado de Sonora, colinda al Norte con el municipio de Huachinera, Sonora, al Este con el estado de Chihuahua, al Sur con el municipio de Sahuaripa y al Oeste con Bacadéhuachi, con coordenadas 29° 16' y 29° 58' Norte, 108° 32' y 109° 12' Oeste.

El poblado de Mesa Tres Ríos es un área con un volumen considerable de basaltos, se encuentra al Noreste del poblado de Nácori Chico, colinda al Este con el área natural protegida "Campo Verde" en Chihuahua.

4.1.1.1.2.1. Geología.

Los estudios en el área son pocos, la mayoría son de áreas cercanas referidos a yacimientos minerales, uno de los estudios a nivel regional fue realizado en la carta de Madera, Sonora, escala 1: 250,000, por el SGM.

En el Cretácico hasta el Paleógeno sucede la Orogenia Laramide, principalmente consistente en una compresión que desarrolla plegamientos y fallas inversas, se presentan intrusivos de dimensión batolítica. Al final del Paleógeno se emplazan rocas félsicas, y por último en el Neógeno, se produce la última extensión tectónica, provocando un fallamiento normal, dando origen a sierras y valles y a magmatismo basáltico de tipo fisural.

En la zona de Mesa de Tres Ríos afloran rocas del Cretácico superior hasta el Holoceno, andesitas, traquitas, toba riolítica, las cuales subyacen a basaltos del Oligoceno (Fig. 4.5), la Formación Baucárit sobreyace a estos basaltos, posteriormente se encuentran basaltos del Cuaternario, los cuales son de espesor pequeño, además de que afloran en el área y no

representan interés en el uso como almacén de CO₂. Los basaltos del Cuaternario, sobreyacen a conglomerados del mismo periodo (SGM, 1999).

El espesor de la pila volcánica excede los 800 m, extendiéndose al municipio de Madera en Chihuahua, los basaltos están compuestos por olivino rico en magnesio, labradorita y augita, en algunas muestras aparecen flogopita y ortopiroxeno como producto de una cristalización tardía (Cochemé, et al., 1991).

La permeabilidad en los basaltos varía, los basaltos del Oligoceno son de permeabilidad media a baja, mientras que los basaltos del Cuaternario son de permeabilidad alta (CONAGUA, et al., 2009).

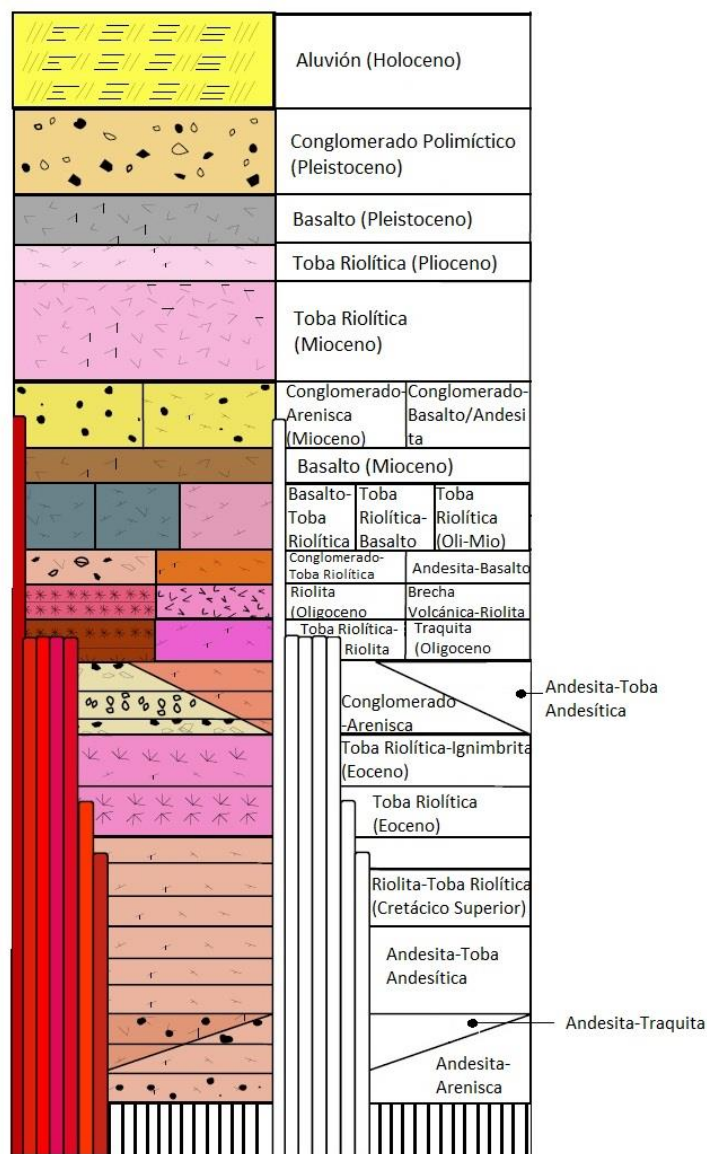


Fig. 4.5. Columna estratigráfica del área de Nacori Chico (CONAGUA, 2009).

En la zona ocurrieron diversos eventos distensivos, que dieron origen a la provincia del *Basin and Range*. Se manifiesta por fracturas de tipo normal en manera escalonada con orientación preferencial noroeste-sureste, las cuales están truncadas por fallas con orientación noroeste- suroeste y algunas este-oeste, las fracturas no muestran una dirección preferencial (CONAGUA, et al., 2009).

Con base a la sección geológica realizada por el SGM en la carta Madera, escala 1:250,000, se observa una falla normal que afecta regionalmente la zona de Mesa Tres Ríos en Sonora (Fig. 4.6), así que el área no muestra una complejidad estructural importante para una posible migración del CO₂.

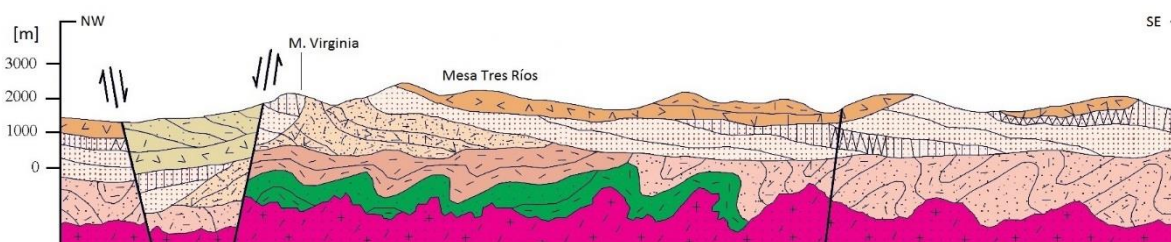


Fig. 4.6. Sección geológica del área de Mesa Tres Ríos, principal área con un volumen importante de basaltos en el municipio de Nácori Chico (SGM, 1999).

4.1.1.2. Basaltos en Chihuahua.

Los volúmenes importantes de basaltos en Chihuahua están relacionados con los encontrados en Sonora. Se encuentran hacia el Oeste del estado, la información disponible es de cartas editadas por el SGM, a escala de 1:250,000, 1:50,000, y de informes en conjunto con CONAGUA de acuíferos del área. Los municipios de interés son Moris, Buenaventura y Madera. En estos municipios se ha encontrado espesores considerables de una secuencia de composición básica y bimodal.

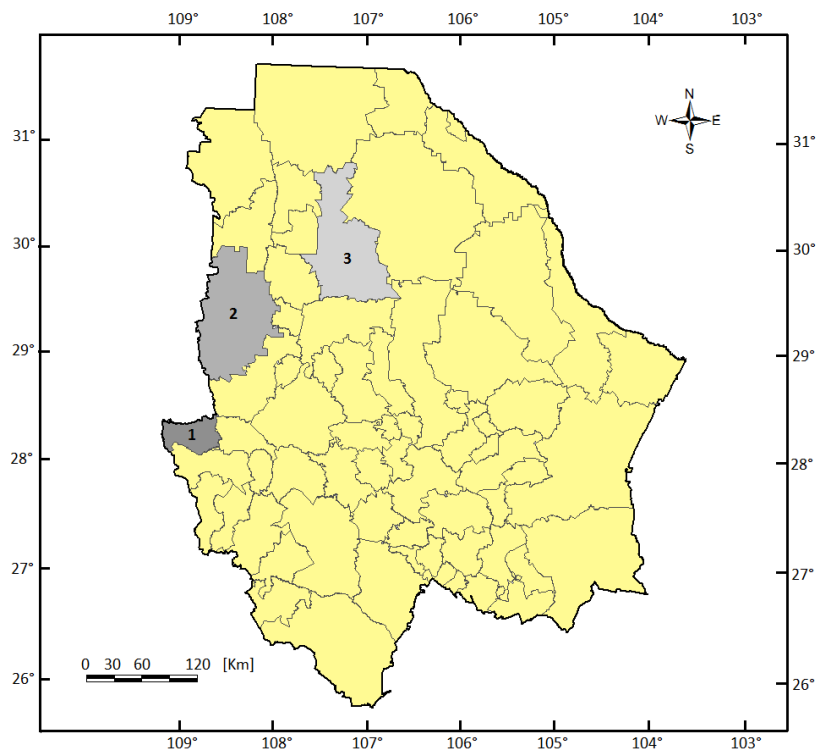


Fig. 4.7. Mapa de Chihuahua, muestra los municipios con volúmenes importantes de basaltos. 1: Municipio de Moris. 2: Municipio de Madera. 3: Municipio de Buenaventura.

4.1.1.2.1. Moris, Chihuahua.

Se localiza al oeste del estado de Chihuahua, en el límite sur del municipio de Yécora, Sonora. El municipio colinda al sur con Uruachi y al Este con Ocampo. Las coordenadas son 27° 57' y 28° 23' Norte, 108° 24' y 109° 05' Oeste.

En el límite Noroeste de la carta Moris, escala 1:50,000, se encuentra el poblado de El Frijolar, donde afloran basaltos de edad Oligoceno.

4.1.1.2.1.1. Geología.

Las rocas que afloran en el lugar son desde el Precámbrico al reciente. En el Cretácico existe un cambio en la sedimentación que se estaba dando en el Jurásico, donde lutitas y areniscas están cubiertas por conglomerados polimícticos y andesitas. En el Paleoceno el vulcanismo es principalmente de composición intermedia. En el Oligoceno el vulcanismo es bimodal, intercalación de tobas riolíticas y basaltos. Estratigráficamente las tobas riolíticas subyacen a los basaltos, mientras que conglomerados, areniscas y aluvión sobreyacen a las rocas máficas.

Los basaltos se encuentran en el ejido de “El Frijolar” y cerca del poblado “El Pilar”, son de color negro a gris oscuro, textura afanítica, mineralogía compuesta por plagioclasa, olivino

y vidrio, como minerales accesorios; anfíboles, piroxenos y magnetita; las vesículas se encuentran rellenas por calcita. El espesor lo calcularon en 300 m aproximadamente, la área de “El Frijolar” se encuentra delimitado por fallas normales, no presenta alteración de tipo hidrotermal (COREMI, 2003).

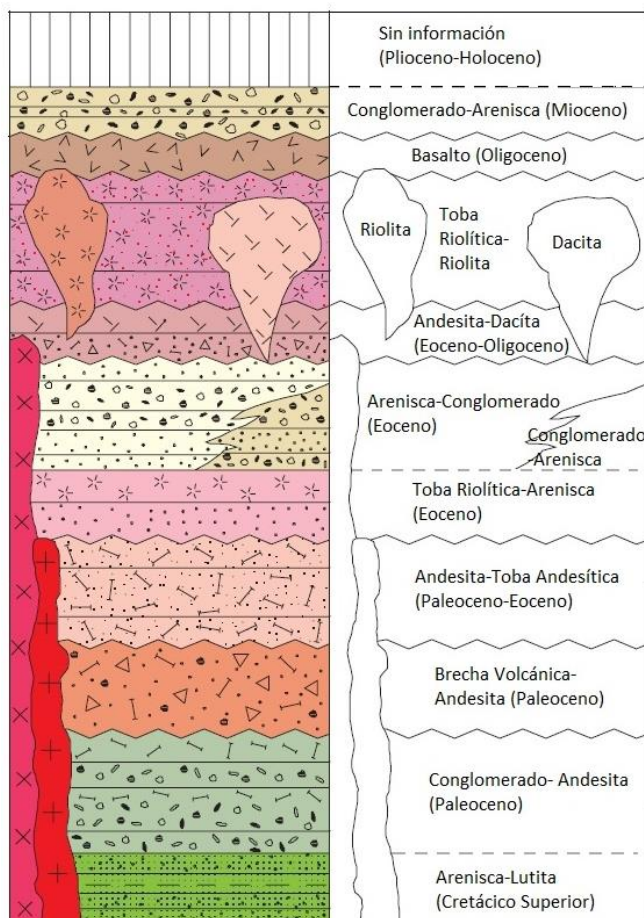


Fig. 4.8. Columna estratigráfica, carta Moris. En la parte superior de la columna se observan los basaltos del Oligoceno, pertenecientes al episodio bimodal que dio origen a ellos (SGM, 2004).

Entre el Mesozoico y el Cenozoico se desarrolló un plegamiento más intenso, deformando las rocas sedimentarias, además de que ocurrió un emplazamiento de cuerpos intrusivos, la deformación frágil es la que predomina en la carta, fallas normales regionales con dirección NW-SE y lineamientos en la misma dirección. La falla regional más importante del área se le conoce como falla Cieneguita, al Noroeste de la carta Moris, se encuentra en el contacto entre las tobas riolíticas y los basaltos, las fallas afectan a las tobas riolíticas que se encuentran en el distrito minero El Pilar. En informes del SGM no existe una falla regional que afecte directamente a los basaltos (COREMI, 2004).

4.1.1.2.2. Buenaventura, Chihuahua.

Se localiza al Noroeste del estado de Chihuahua, limita al Oeste con el municipio de Ignacio Zaragoza, el cual colinda con el Municipio de Madera donde se encuentra una secuencia máfica la cual sigue hasta el municipio de Buenaventura. La región comprende las coordenadas 29° 00' y 30° 00' N, 106° 00' y 108° 00' Oeste (SGM, 1998).

4.1.1.2.2.1. Geología.

Posterior a la Orogenia Laramide durante el Paleógeno y Neógeno sucede la subducción de la placa de Farallón bajo la placa Norteamericana, dando origen a fallas normales regionales y magmatismo de la Sierra Madre Occidental.

Antes del Cretácico lo que sobresale son rocas de carácter sedimentario principalmente calizas. En el Paleógeno existe vulcanismo bimodal el cual abarca el área del municipio de Buenaventura, más específico al final del Oligoceno se extruyen basaltos, conocidos como basalto “El Milagro”, se ha definido como un paquete de 25 flujos de basalto identificados que está intercalado con riolitas, su localidad tipo se encuentra en la Sierra de Gallegos, Chihuahua. Los basaltos son de color gris oscuro a negro, en flujos delgados y vesiculares rellenos de sílice, calcita y zeolitas, con textura porfídica, fenocristales de labradorita, andesina, oligoclasa y olivino que está alterado a iddingsita, hematita y magnetita diseminada, por su composición llegan a ser basaltos toleiticos y cristalinos, su espesor es variable de 10 m hasta 800 m. La parte inferior de los basaltos son tobas riolíticas del Oligoceno, y lo subyacen un paquete importante de conglomerados polimícticos del Mioceno (COREMI, 1997). El fracturamiento presente es poco intenso y fallamiento de tipo normal, las rocas félsicas son las que se encuentran en la cima dejando debajo los basaltos. CONAGUA ha realizado estudios del subsuelo del área encontrando que el espesor del aluvión llega hasta los 300 m y por debajo se encuentran los basaltos, de los cuales no se ha determinado el espesor (CONAGUA, 2015). A continuación, se muestra la columna estratigráfica (Fig. 4.9) del área Buenaventura, Chihuahua, del Paleógeno al Reciente.

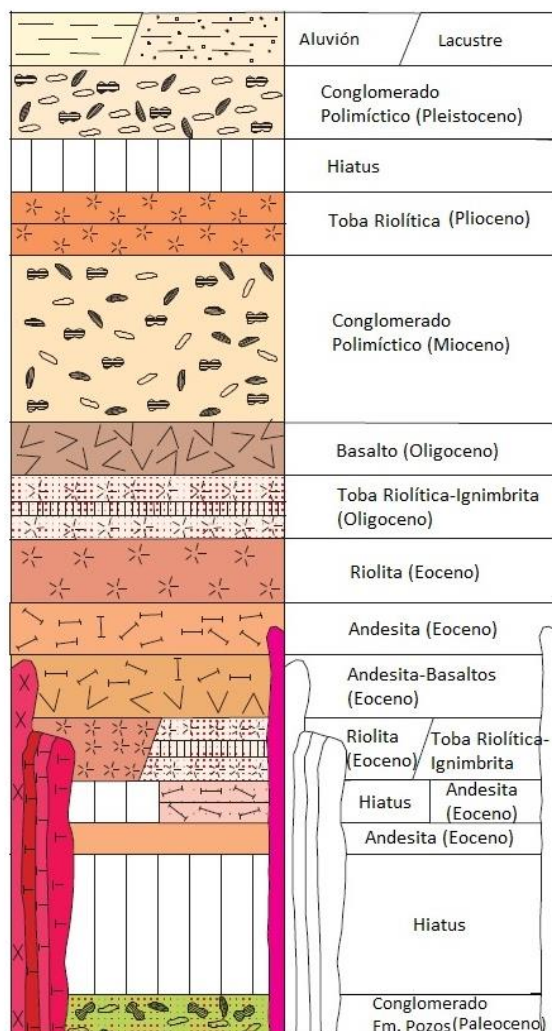


Fig. 4.9. Columna estratigráfica de la región del municipio de Buenaventura (SGM, 1998).

Se presenta deformación frágil en el área. Aunque el fracturamiento no es intenso y las fallas normales son las que predominan. Los basaltos se encuentran distribuidos ampliamente según la carta Buenaventura, Chihuahua. En las sierras de Las Tunas y El Pajarito, ambas sierras están limitadas por fallas normales, ambas con rumbo N 55°W, sin aparente basculamiento, el fracturamiento aunque no es intenso afecta a parte de los basaltos llegando hasta los aluviones con rumbo N 55° W (Conagua, 2015).

4.1.2. Basaltos en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

En provincia de la Faja Volcánica Transmexicana el vulcanismo es diverso, con composiciones intermedias y félsicas, con un episodio máfico importante en el Mioceno.

La actividad en la FVTM inició en el Mioceno llegando al Reciente, durante este tiempo se han registrado cuatro episodios principales; 1) desde 20 a 10 Ma, un arco de composición

intermedia (andesítico), 2) aproximadamente hace 11 Ma, un episodio máfico que disminuye de Oeste a Este, debido a un cese en la subducción debajo de Baja California, 3) de 7.5 a 3 Ma aproximadamente, vulcanismo silícico principalmente, 4) al final del Plioceno se presenta un arco con variabilidad composicional (Gómez-Tuena, et al., 2005; Ferrari, et al., 2012).

La FVTM se extiende a lo largo de aproximadamente 1,000 km, desde San Blás, Nayarit hasta Palma Sola, Veracruz, cubriendo un área de 160,000 km². Se divide en tres sectores en base a la geología y tectónica; parte occidental, centro y oriental (Gómez-Tuena, et al., 2005).

Dentro de las tres secciones en las que se ha dividido la FVTM se encuentran volúmenes considerables de basaltos, siendo del lado Oeste el de mayor volumen y espesor, disminuyendo hacia el Este. En el episodio máfico del Mioceno se han encontrado los mayores afloramientos en Nayarit y Jalisco, siendo de menor magnitud en Querétaro e Hidalgo en el área geotérmica de Pathé.

Aunque los sitios mencionados no son los únicos donde existen basaltos, son los que mayor volumen representa y sobresalen de este episodio. Por otra parte, las áreas en Tenancingo, Malinalco, Tlaxcala, Puebla, así como el campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Paricutín, Jorullo, por mencionar algunos) muestran derrames basálticos que van desde 10 hasta 70 m, sin representar un volumen importante, según Hasenaka, et al., 1985, el volumen en 15,000 km² del campo Michoacán-Guanajuato lo estimaron en 31 km³, mientras que del volcán Jorullo, Guilbaud et al., 2011, estimaron un volumen de 10.2 km³. En Tlaxcala y Puebla, los basaltos se encuentran en superficie y muestran espesores de 100 m o menores aproximadamente.

Es importante mencionar que, tomando en cuenta los estudios realizados con un fin similar al de esta tesis, en Islandia y Estados Unidos respecto a espesores de seguridad de almacenamiento, estos no son aptos para ser utilizados, debido a la incertidumbre de su continuidad en el subsuelo. Los basaltos de edad recientes no se toman en cuenta debido a que estos afloran y uno de los parámetros más importantes para el almacenamiento geológico de CO₂ es que se encuentren en el subsuelo.

Al enfocarme en los basaltos del Mioceno es debido principalmente al volumen de cientos de km³ que manejan los autores por ejemplo en Jalisco, y también existe evidencia que se encuentran en el subsuelo (en su mayoría estudios realizados por CFE), por otro lado, la geología estructural local de cada área muestra que aunque existen fallas cercanas a los sitios, estas no llegan a afectar a los basaltos.

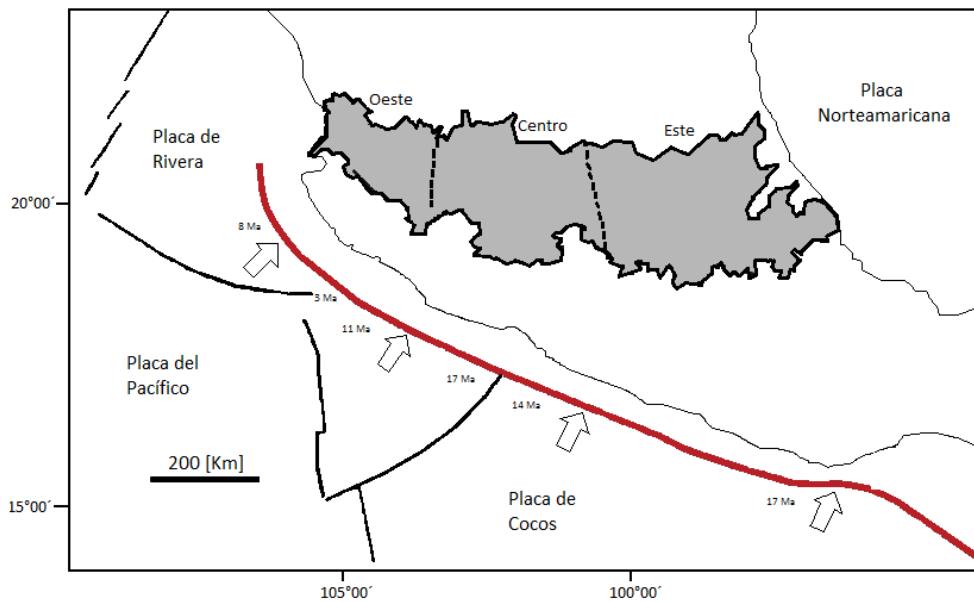


Fig. 4.10. Localización de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su principal división, en Oeste, Centro, Este, que se extiende de la costa Occidental hasta el Golfo de México (modificado de Gómez-Tuena, et al., 2016).

4.1.2.1. Nayarit.

El estado cuenta con volúmenes grandes de rocas volcánicas, las rocas máficas localizadas en cuatro áreas principales, el Noroeste de Tepic, al Sur del estado límite con Jalisco en San Pedro-Ceboruco, en las costas de Nayarit correspondientes a Punta Mita y Punta Raza y por último Isla Isabel a 50 km de la plataforma continental.

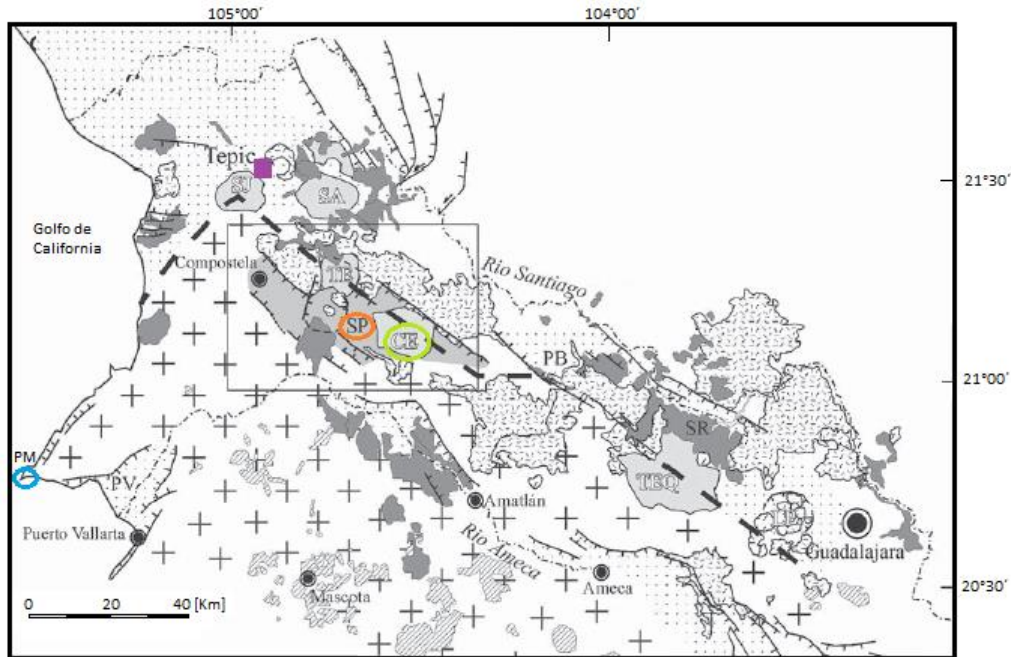


Fig. 4.11. Localización de las secuencias máficas en el estado de Nayarit, el área de Tepic con punto morado, SP: San Pedro en color naranja, CE: Ceboruco en color verde, por último, en el extremo inferior izquierdo en color azul, el área de Punta Mita (Ferrari, et al., 2003).

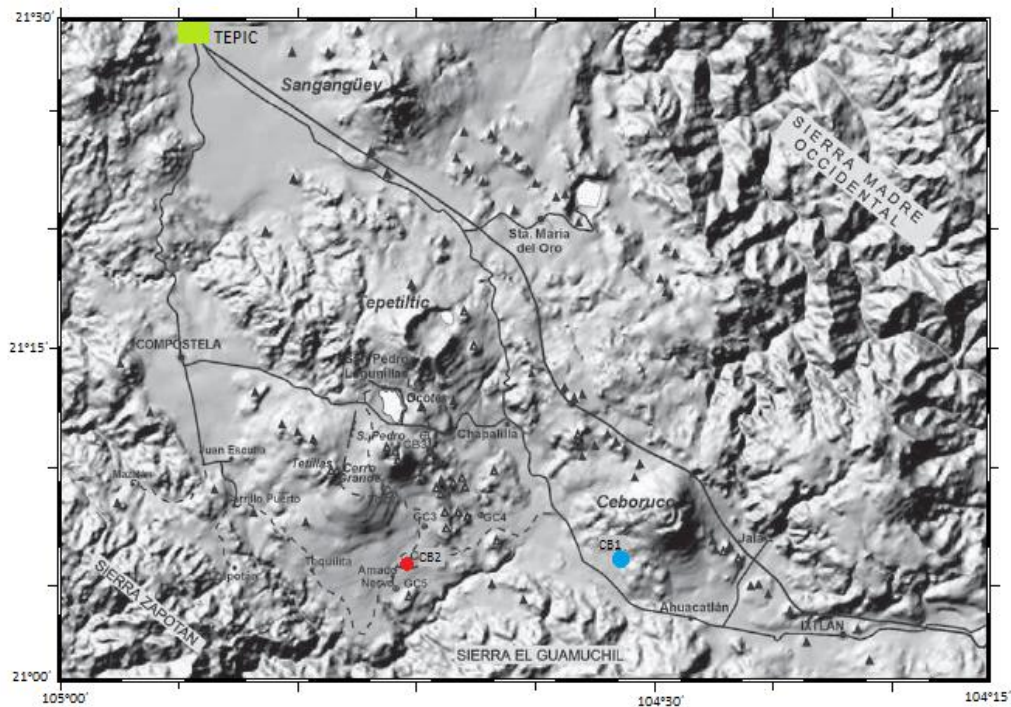


Fig. 4.12. Localización de los pozos perforados por CFE en el área de San Pedro-Ceboruco, Nayarit. El pozo CB1 en color azul. El pozo CB2 en color rojo (Ferrari, et al., 2003).

4.1.2.1.1. Geología.

En el año 2000 en un artículo de Ferarri et al., aparece el Distrito volcánico Nayarit, describiendo áreas cercanas a Tepic, San Pedro-Ceboruco, Punta Mita y Punta Raza en donde se encuentran expuestos flujos delgados con un rango de espesor de 50 cm a 5 m. La unidad tiene un espesor mínimo de 150 m, cubriendo un área de 450 km². La composición de las rocas máficas varía de basaltos a andesita basáltica, presentan textura porfídica con fenocristales de olivino y clinopiroxeno, en menor cantidad de plagioclasa y óxidos, las edades comprenden de 11.2 y 8.7 Ma perteneciendo al Mioceno.

Al Sur de Nayarit en el área de San Pedro-Ceboruco se realizaron estudios por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El pozo CB1 se localiza a 3 km al Sur del volcán Ceboruco, tiene una profundidad de aproximadamente 2,800 m, con una temperatura máxima reportada de 115°C, en la exploración del pozo se encontró una sucesión máfica de 850 m de espesor, la cual está intercalada con flujos menores de pumicita. Esta sucesión descansa sobre rocas volcánicas alteradas correlacionadas con la sucesión del bloque Jalisco del pozo CB2, con una porosidad y permeabilidad promedio de aproximadamente 11% y 2.0 mD, respectivamente. La edad comprende de 7.2 a 8.5 Ma y tienen una composición sub alcalina, que sugiere una correlación con los basaltos Cinco de Mayo en Tepic (Ferrari, et al., 2000; Ferrari, et al., 2003; Urrutia-Fucugauchi, et al., 2000; Hiriart-Le Bert, G., et al., 2011).

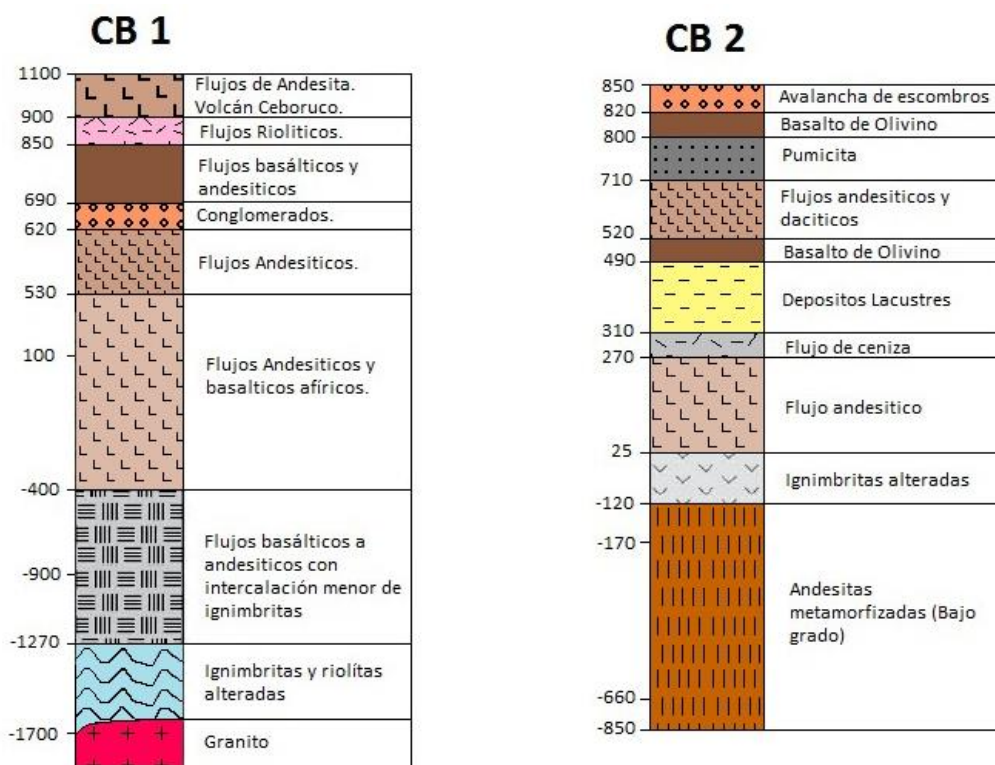


Fig. 4.13. Columnas estratigráficas de los pozos perforados por CFE en el área de San Pedro- Ceboruco. A la izquierda el pozo CB1, localizado al Suroeste del volcán Ceboruco, a la derecha el pozo CB2, localizado al Sur de San Pedro (Ferrari, et al., 2003).

En la costas de Nayarit, en la parte Suroeste límite con Jalisco, en Punta Mita y Punta Raza, los flujos máficos cubren un área de 8 km², con un espesor mínimo de 150 m, con edades de 10.2 a 8.9 Ma, la composición es de basaltos a andesitas basálticas, con fenocristales de olivino, en menor cantidad de plagioclasa, clinopiroxeno, óxidos y vidrio, como minerales secundarios están presentes calcita y clorita, el primero en algunos casos en vesículas, algunos basaltos están emplazados en forma de lavas almohadilladas (Ferrari, et al., 2000; Ferrari, et al., 1999; Urrutia-Fucugauchi, et al., 2000).

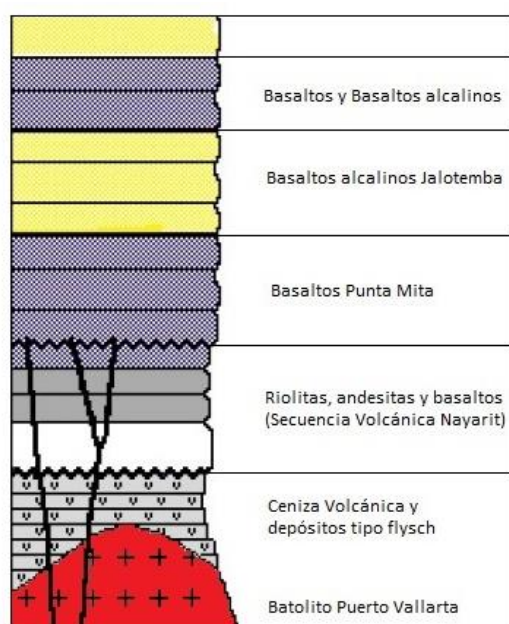


Fig. 4.14. Columna estratigráfica de la Costa de Nayarit, con presencia de basaltos alcalinos principalmente (Ferrari, et al., 1999).

Por último la Isla Isabel, presenta vulcanismo tipo intraplaca, la composición en su mayoría es basáltica, llegando a traquibasaltos, presentan olivino con inclusiones de espinela, plagioclasa y clinopiroxeno, el volumen estimado es de 4.3 km³ (Housh, et al., 2010), no se han manejado espesores, pero debido a que es un área naturalmente protegida y se rige por programas de protección, conservación, restauración y desarrollo, podría constituir una barrera para utilizarse para los fines mencionados en el objetivo de esta tesis.

La zona de Tepic, regionalmente se encuentra afectada por fallas y fracturas normales, con orientación NW-SE, lo cual inicia en el graben Chapala-Tepic; algunas otras fallas asociadas a aparatos volcánicos forman grabens y horst, además de fracturamiento radial. Los aparatos volcánicos se encuentran alineados con rumbo preferencial de N45°W, mientras

alineamientos de fallas y fracturas de menor importancia presentan un rumbo NE-SW (CONAGUA, 2015).

En general el estado de Nayarit está afectado por fallas normales, de tipo extensivas, en varios casos aún activas. Lo cual, en su oportunidad, debería aclararse dados los fines expresados en este trabajo.

Particularmente en la región de Punta Mita se ve afectada por la cercanía de un punto triple, el cual la convierte en una región de alta sismicidad. Uno de los mayores eventos estructuralmente hablando ocurrió hace 5 millones de años creando un sistema de fallas regionales con orientación NE (CONAGUA, 2015).

4.1.2.2. Jalisco.

La secuencia expuesta en el estado de Jalisco se localiza a las orillas del Río Santiago, que parte desde Nayarit, y poblados cercanos al río, forman parte de lo que se conoce como episodio máfico del Mioceno. Las zonas estudiadas con anterioridad y que definen una región máfica expuesta son las delimitadas por las poblaciones: San Cristóbal, Ixtlahuacán, San Rosa, Arandas, Tepatitlán, Los Altos de Jalisco, por mencionar algunas.

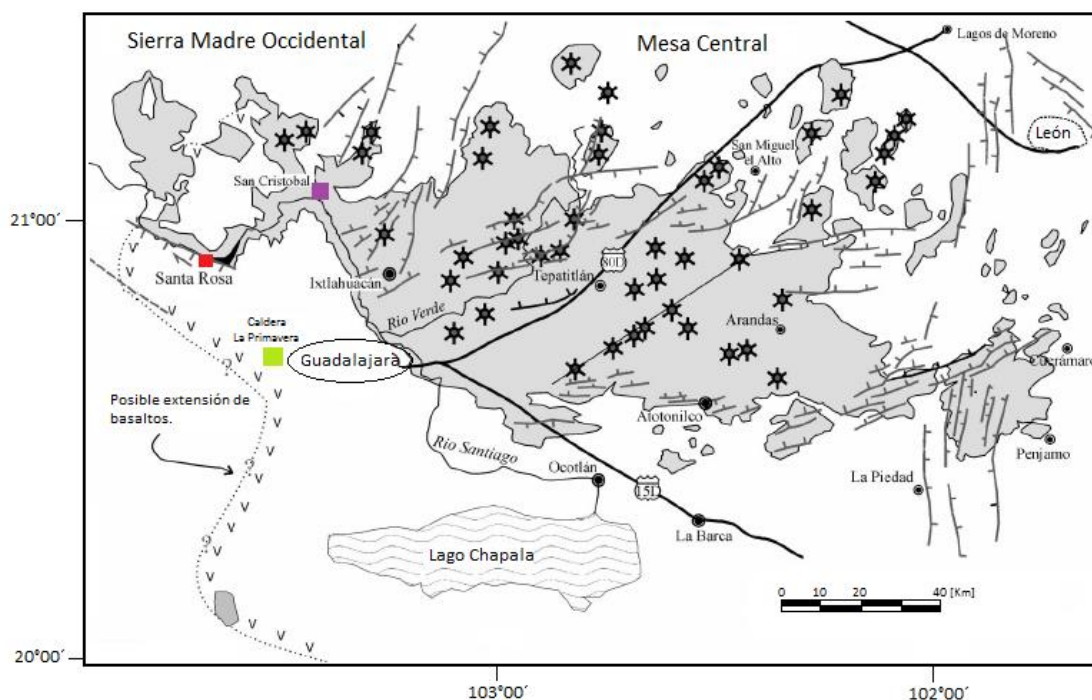


Fig. 4.15. Localización de la secuencia máfica del Mioceno en el área de Jalisco, en color gris, y con línea punteada su posible extensión de basaltos en la área. Secuencia San Cristóbal en color morado. Secuencia Santa Rosa en color rojo. Pozos perforados por CFE en la Caldera La Primavera en color verde (Alva-Valdivia, et al., 2000).

4.1.2.2.1. Geología.

El estado de Jalisco cuenta con abundantes estudios la parte petrológica, estratigráfica y tectónica. Forma parte del llamado bloque Jalisco, los artículos científicos publicados hasta ahora también se han apoyado en estudios realizados en la caldera La Primavera por CFE, los cuales dan un panorama más amplio de zona, ya que complementan la parte expuesta con la parte estratigráfica de los pozos profundos perforados por CFE.

La secuencia máfica en el estado de Jalisco es de composición basáltica, andesita basáltica y andesitas. La principal unidad expuesta a lo largo del río Santiago son los basaltos San Cristóbal, esta unidad forma parte del Grupo Río Santiago (1800 km³), el cual está integrado por los basaltos San Cristóbal, toba San Cristóbal, toba Los Caballos y basaltos Arroyo Mezcala. Los basaltos San Cristóbal es una sucesión de un espesor máximo de 800 m donde la base no se encuentra expuesta, el espesor disminuye hacia el Este, en el área de Los Altos de Jalisco llega a los 250 a 200 m en promedio (Ferrari et al., 1994 estima un volumen de 3000 km³), los cuales descansan discordantemente sobre conglomerados, los flujos individuales son de 2 a 20 m de espesor. La composición es de basaltos a andesita basáltica, presenta textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y olivino, este último alterado a iddingsita, en menor cantidad clinopiroxeno, y calcita en vesículas. Se le ha datado una edad de 11 a 9 Ma. La toba Los Caballos sobreyace a los basaltos San Cristóbal, es una secuencia de 100 m de espesor, compuesta por pumicita y flujos piroclásticos. En la parte superior del grupo río Santiago se encuentra los basaltos Arroyo Mezcala, teniendo un espesor de máximo de 250 m. Son masivos con textura afanítica y con un volumen de 5.2 km³ (Ferrari, et al., 1999; Rossotti, et al., 2002).

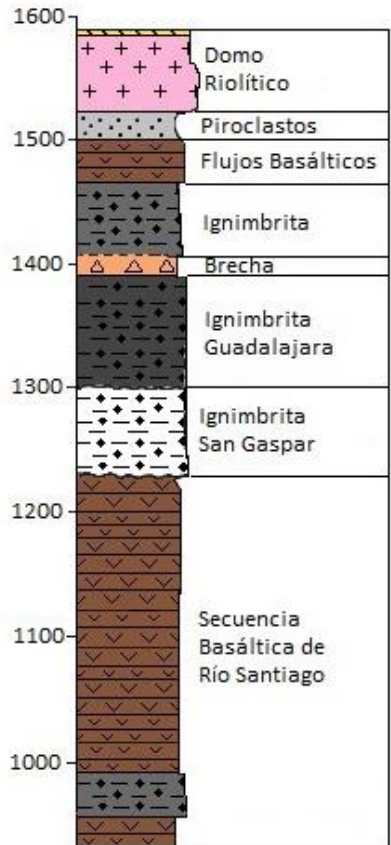


Fig. 4.16. Columna estratigráfica que pertenece a un promedio de los pozos perforados por la CFE en la Caldera La Primavera, destaca la secuencia basáltica de Río Santiago (Ferrari, et al., 1999).

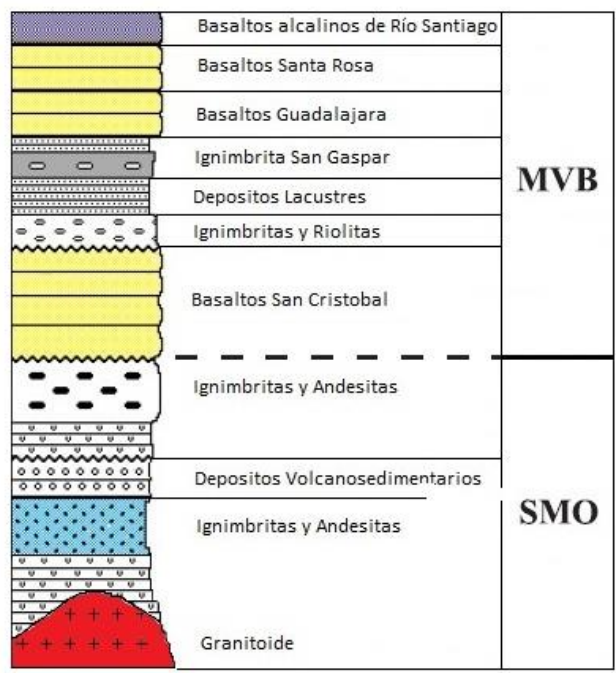


Fig. 4.17. Columna estratigráfica del área de Río Santiago, la parte superior corresponde al episodio máfico del Mioceno que se desarrolló en el área de San Cristóbal-Santa Rosa (Ferrari, et al., 1999).

En caldera La Primavera la CFE perforó 13 pozos, nombrándolos de PR-1 hasta PR-13. Realizaron una columna estratigráfica con los datos promedio de 10 pozos, resultando en una secuencia de aproximadamente 1150 m de profundidad. Dicha secuencia tiene en la base granito, andesitas y riolitas, seguido de una unidad máfica de basaltos y andesitas basálticas de más de 800 m con textura porfídica y contenido de plagioclasas, olivino y vidrio que se han correlacionado con los basaltos San Cristóbal. Se encontraron minerales de alteración hidrotermal como epidota, calcita y pirita. La edad que obtuvieron fue de 12.5 Ma, posterior a la unidad máfica la cubren andesitas, riolitas, tobas y depósitos lacustres; las riolitas que subyacen a la unidad máfica son no permeables, las riolitas que sobreyacen siendo del Cuaternario presentan permeabilidad baja, tanto la porosidad y permeabilidad están relacionadas con fracturamiento (Ferrari, et al., 1999; Urrutia-Fugugauchi, et al., 2000; Gutiérrez-Negrín, 1988).



Fig. 4.18. Columna estratigráfica pozo PR-9, caldera La Primavera (Rosas-Elguera, et al., 1997).

El grupo río Santiago está cubierto por lo que Rossotti et al., 2002 menciona como grupo Guadalajara (212 km³). Este grupo es principalmente de composición silícica (riolitas), dentro este grupo se pueden encontrar dos unidades basálticas, basalto Mirador de Ixtacán y basalto Santa Rosa, el primero presenta textura porfídica, abundante olivino el cual está

alterado a iddingsita, en menor cantidad piroxeno, vidrio y óxidos, la edad se encuentra en el rango de 4.7 a 3.7 Ma; el basalto Santa Rosa han determinado una afinidad alcalina, con abundante plagioclasa, olivino y augita, el espesor mínimo es de 150 m.

El área se encuentra dentro del bloque Jalisco el cual se considera una región activa, que incluye los estados de Nayarit, Jalisco, Colima y parte de Michoacán. Existe la presencia de pilares y fosas como la de Chapala, Minatitlán, Colima y Zacoalco, que controlan el emplazamiento de conos cineríticos y coladas basálticas. Las fosas rellenas por material desintegrado de rocas existentes.

Las fallas regionales son normales con orientación NW, afectando los basaltos San Cristóbal y Santa Rosa. Los lineamientos menores presentan un rumbo N 20° W y N 20° E, en cambio, la fosa de Chapala muestra fallas normales con orientación W-E, predominan los esfuerzos extensivos en toda la región (SGM, 2017). En la zona de Los Altos de Jalisco está marcada por dos sistemas de fallas extensionales con orientación E-W a NE (Ferrari, et al., 2000). La zona se encuentra intensamente fracturada, principalmente con rumbo NE-SW (Rodríguez-Castañeda, et al., 1992).

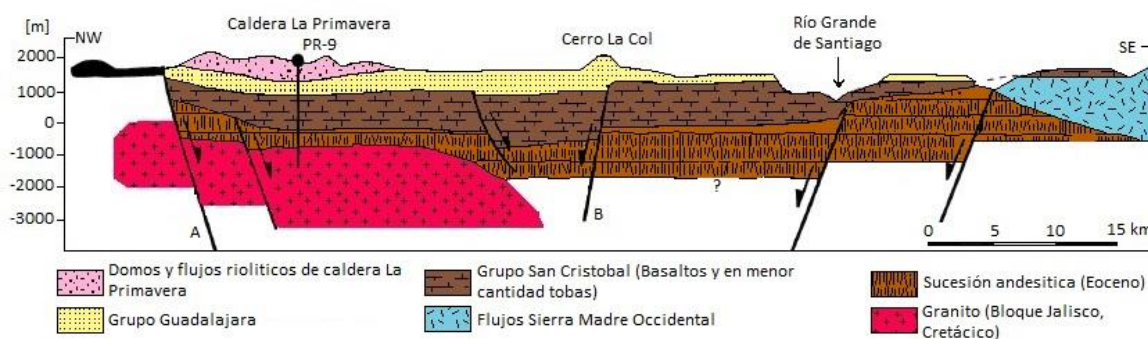


Fig. 4.19. Sección geológica del área de la caldera La Primavera al río Santiago donde se localizan los volúmenes importantes de basaltos. Muestra las fallas que afectan a la zona y secuencia máfica. La falla A representa el sistema de fallas Plan de Barrancas inferido de un modelo gravimétrico. La falla B es el sistema de fallas Santa Rosa-Cinco Minas (Rosas-Elguera, et al., 1997).

4.1.2.3. Querétaro.

Dentro del episodio máfico del Mioceno, el Estado de Querétaro presenta una menor manifestación de rocas máficas, las localidades en las que se han encontrado es en Amazcala, Amealco y San Juan del Río; la caldera de Amazcala se localiza a 30 km al Noreste de la capital Santiago de Querétaro, mientras que la caldera Amealco y San Juan del Río se encuentran al Sureste de la capital; el segundo, cercano a los límites con el estado de Hidalgo.

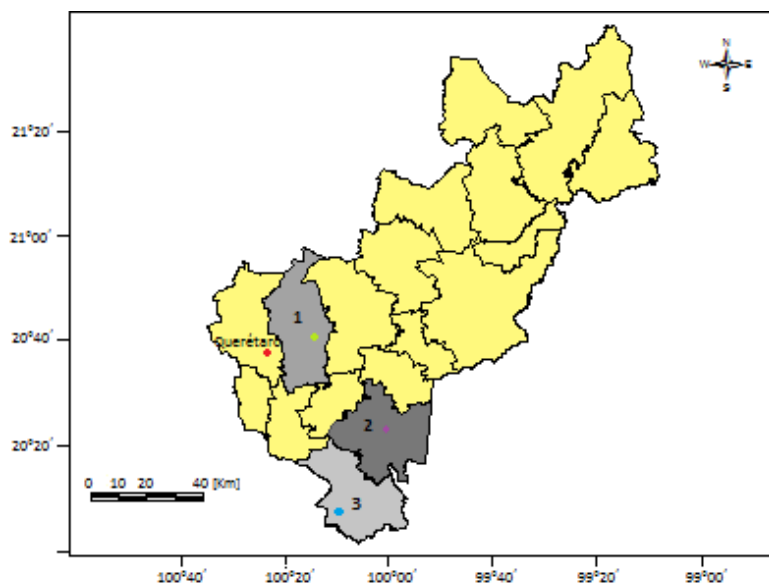


Fig. 4.20. Localización de la Secuencia Máfica de Querétaro (QMS). 1: Caldera de Amazcala. 2: Secuencia volcánica San Juan del Río. 3: Caldera de Amealco.

4.1.2.3.1. Geología.

La secuencia máfica de Querétaro del Mioceno consiste de flujos de lava de 20 a 80 m de espesor intercalados con depósitos fluviales, lacustres, y en menor proporción flujos piroclásticos y pumicitas. Las rocas máficas e intermedias presentan una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y en menor cantidad olivino, en lamina delgada con cristales euhedrales a subhedrales, tanto las andesitas basálticas como los basaltos presentan cantidades anómalas de titanio. La secuencia se eleva a los 1,950 m sobre el nivel del mar, al Oeste de Querétaro, estratigráficamente, en la base se encuentran ignimbritas de la Sierra Madre Occidental, le sobreyace la secuencia máfica de Querétaro, seguido de la ignimbrita de Los Azufres y en la parte superior coronando la secuencia son las ignimbritas de Amealco (Ferrari, et al., 2000, Ferrari, et al., 1994).

Dentro de la caldera de Amealco existen flujos menores de basaltos, representan el inicio del magmatismo y la fase pre caldera, presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa cálcica y alto contenido de olivino. Se desconoce la profundidad y espesor de la unidad completa ya que los pozos no han logrado llegar a ella, las ignimbritas es lo que resalta de esta caldera, con contenido de líticos de basaltos, andesitas basálticas y dacitas. En la etapa post caldera en el Pleistoceno se formaron mesetas considerables de basaltos de color gris oscuro, textura afanítica, compacta con fenocristales de plagioclasa cálcica, al igual que la unidad pre caldera se desconoce el espesor. Algunos pozos sugieren que los basaltos que subyacen a las tobas de Amealco se encuentran a una profundidad de 70 a 150

m. Finalmente, hay depósitos aluviales recientes sobreyaciendo la secuencia (Verma, et al., 1991; CONAGUA, 2015).

En la caldera de Amazcala se presenta una sucesión de basaltos conocida como basaltos San José El Alto, los espesores son pequeños, de 2 a 15 m, son de color gris oscuro y presentan fenocristales de olivino, plagioclasa y piroxeno (Aguirre-Díaz, et al., 2001).

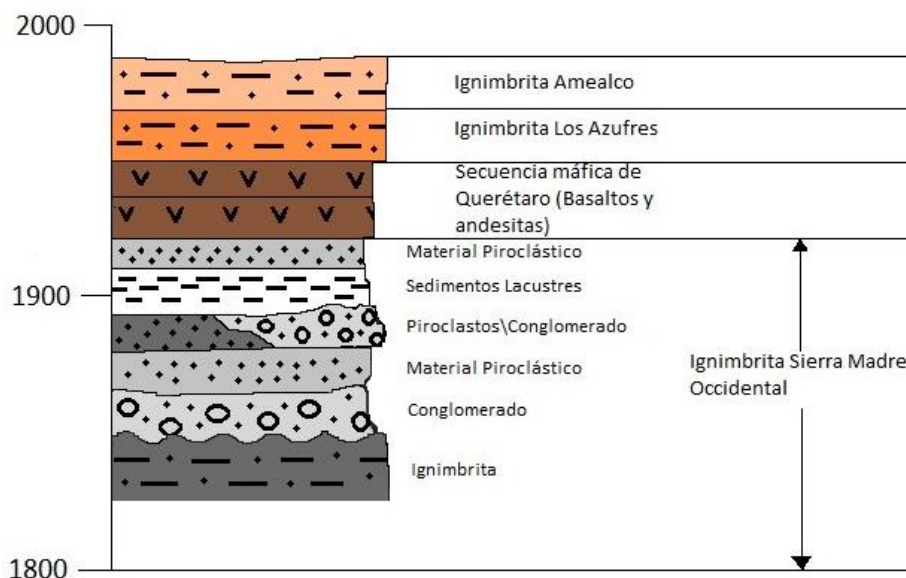


Fig. 4.21. Columna estratigráfica de la Secuencia máfica de Querétaro- San Juan del Río (Ferrari, et al., 1994).

Hacia el Oeste de Querétaro se muestra un sistema de fallas normales con orientación NW a lo largo de la Sierra de Guanajuato; otro sistema conocido como Querétaro-Taxco tiene una tendencia NW, el cual se reactivó en el Mesozoico, ambos afectando la secuencia máfica de Querétaro descrita por Ferrari, et al., 1994.

Referente al basamento de andesitas y basaltos en la caldera Amealco, existe un alto fracturamiento sin una dirección preferencial. Con la profundidad las fracturas se van perdiendo y en algunos casos se encuentran rellenas por material granular. La caldera está afectada por un sistema de fallas con dirección Este-Oeste que son parte de las fallas Chapala-Cuitzeo-Acambay, esta última es una falla activa por segmentos (CONAGUA, 2005; Aguirre-Díaz, et al., 1999).

En el lado sur de del valle de Amazcala se ubica la falla San José El Alto y una serie de fallas que se han inferido con orientación Este-Oeste, con longitud de aproximadamente 20 km y desnivel de 100 m (Hernández-Pérez, 2014).

4.1.2.4. Pathé, Hidalgo.

El área geotérmica de Pathé se encuentra en el límite entre Querétaro e Hidalgo, cerca de los poblados de Tecozautla y Huichapan. En esta zona se ubica la que fue la primera planta de energía geotérmica en América, la cual estuvo a cargo de CFE. En la región existe una variedad de manifestaciones superficiales como alteraciones hidrotermales, geiseres extintos y manantiales; los estudios realizados se centran en la litología y en la parte tectónica y estructural del área.

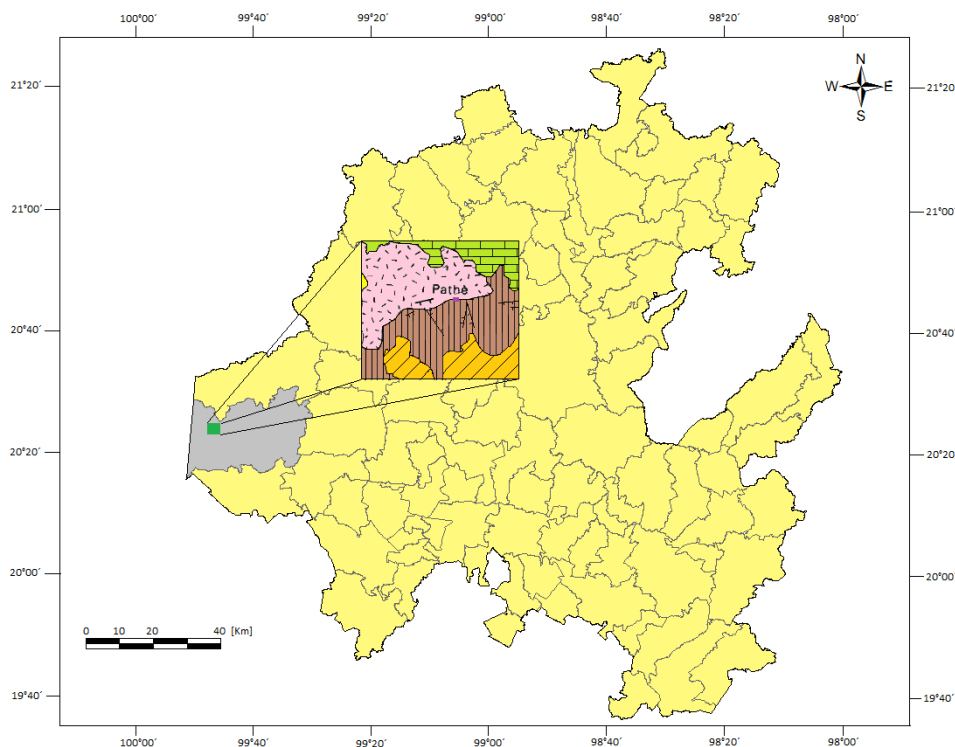


Fig. 4.22. Localización del área geotérmica de Pathé, Hidalgo.

4.1.2.4.1. Geología.

El área de Pathé representa un área de gran importancia para la Geotermia en México, los flujos de lava se relacionan con el episodio máfico del Mioceno que afectó desde Nayarit hasta Hidalgo, siendo de menor magnitud en esta área.

La secuencia está expuesta en el cañón del Río San Juan, en la base se encuentran andesitas, basaltos y en menor proporción riolitas y material piroclástico; le sobreyacen depósitos lacustres y fluviales, terminando la secuencia con flujos de andesitas y basaltos de 6 Ma (Gutierrez-Negrin, et al., 2000). Los flujos de lava se presentan como una sucesión de 80 a 300 m de espesor, cada flujo tiene un espesor promedio de 15 m con intercalación de andesitas, riolitas y flujos piroclásticos en la parte Oeste, hacia la parte Este la secuencia

descansa sobre las formaciones carbonatadas del Doctor y Soyatal del Cretácico. Las rocas volcánicas presentan texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y en menor cantidad de olivino que se encuentra alterada a iddingsita, CaO y MgO se presentan en una cantidad considerable en muestras que tomaron en el área (Ferrari, et al., 2000). Entre los derrames basálticos se ha encontrado lapilli, tezontle, brechas que le confieren a los flujos buena porosidad y permeabilidad, la porosidad mínima es de 4% llegando a ser de 20% como máximo, en promedio la permeabilidad se encuentra en 2.2 mD (CONAGUA, 2015; Hiriart-Le Bert, G., et al., 2011).

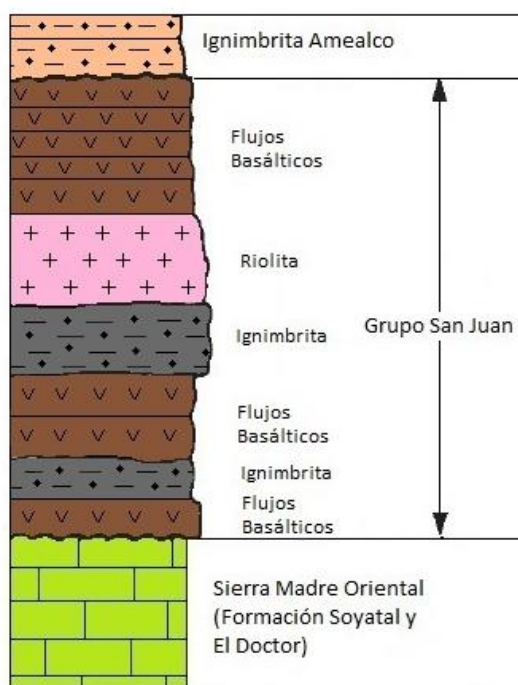


Fig. 4.23. Columna estratigráfica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo (Ferrari, et al., 1994).

Estructuralmente es un área con fallamiento normal, las fallas tienen una orientación preferencial cercana a N-S y E-W, el desplazamiento E-W es el que afecta a los derrames basálticos desplazándolos 30 m verticalmente desde la base, la falla tiene una longitud de 14 km cerca de las localidades de Rio San Juan y Tecozautla. Una segunda falla con dirección E-W, afecta a derrames basálticos y una unidad pumicitica desfasándola por 7 m, hacia el Oeste el desplazamiento varia de 25 a 30 m. Dentro de la región existe un conjunto de 12 fallas mayores que afectan tanto a los basaltos como a las unidades que lo sobreyacen como las riolitas y tobas pumiciticas (Carrillo-Martinez, 1998).

Las fallas y fracturas con orientación N-S y se han interpretado como previas a la FVTM, aunque los investigadores no descartan que algunas fallas se hayan reactivado durante o posterior a la actividad del Mioceno en la FVTM (CONAGUA, 2015).

El área en general representa cierta complejidad estructural, debido a que se encuentra un fallamiento y fracturamiento importante, observando grabens siendo el de Aljibes el más importante.

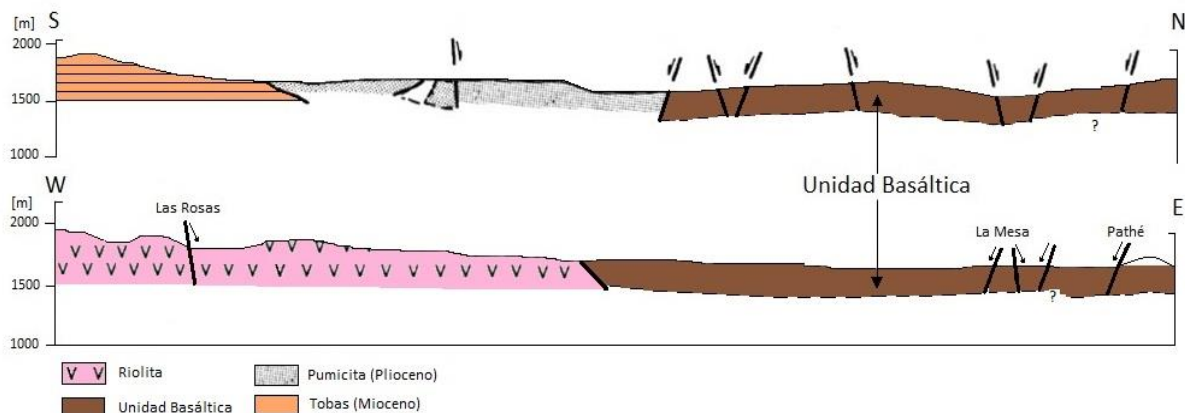


Fig. 4.24. Sección esquemática muestra las fallas que afectan principalmente a la unidad basáltica del área de Pathé (Carrillo- Martínez, 1998).

4.1.2.5. Campo Volcánico Palma Sola.

Se localiza en la parte central del estado de Veracruz, comprende el área de Chiconquiaco y Palma Sola, la estratigrafía del Mioceno al Reciente del área es de andesitas basálticas y basaltos fisurales, los cuales están separados por una discontinuidad erosional de las rocas intrusivas (gabros a granitos), (Gómez-Tuena, 2002). Cubre un área de 1,700 km², la sucesión considera un espesor mayor a los 800 m y los flujos individuales van de 10 a 15 m intercalados con paleosuelos y depósitos aluviales (Ferrari, et al., 2005a).

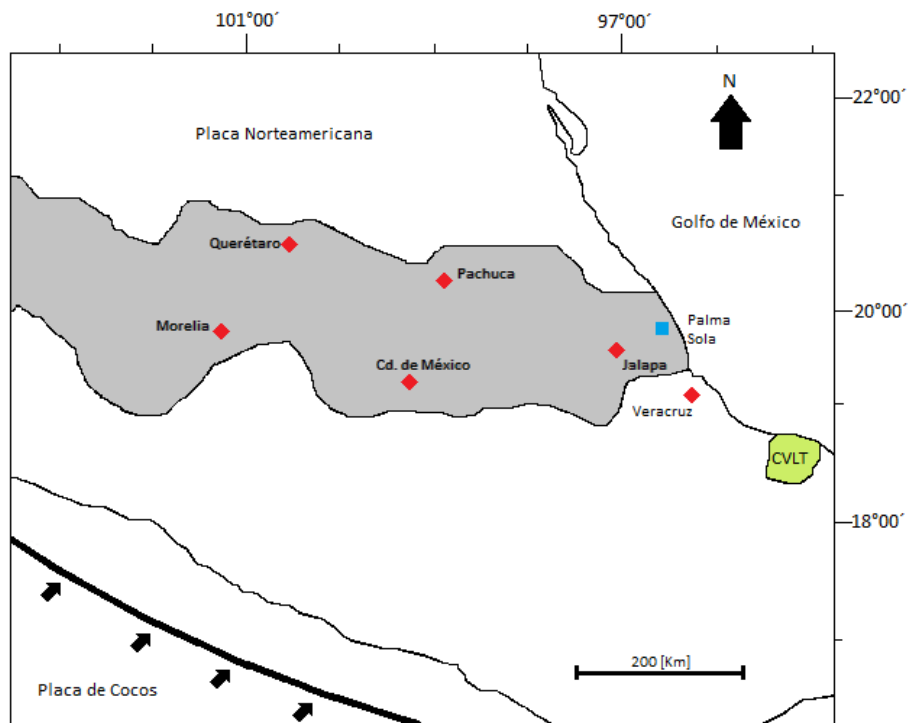


Fig. 4.25. Localización del Campo Volcánico Palma Sola en color azul. CVLT: Campo Volcánico Los Tuxtlas en color verde.

El área de Chiconquiaco es de composición de basanita a benmorita, los basaltos son ricos en olivino, color gris oscuro, textura afanítica, estructura vesicular y amigdaloidal, intercalados con tobas, se encuentran cubiertos por tobas riolíticas en la parte centro. Mientras tanto, en el área de Palma Sola es de composición basáltica a traquibasáltica, los basaltos son de color gris a rojizo, textura afanítica, estructura masiva y en algunas zonas presenta pseudoestratificación (SGM, 2007); son ricos en olivino, además contiene plagioclasas, clinopiroxeno, ortopiroxeno y es muy vesicular (Gómez-Tuena, 2002) y sobreyacen a las andesitas basálticas de color gris y verde, textura porfídica, masivas, con alto contenido de plagioclasa y con intensa alteración hidrotermal.

Respecto a la parte estructural del área de Palma Sola y Chiconquiaco, las rocas del Eoceno al reciente no muestran evidencia de ser afectados por esfuerzos que afectaron el área con anterioridad (Ferrari, et al., 2005a). Las fallas normales y fracturas son pocas, se presentan sistemas conjugados con orientación NW-SE a NE-SW asociadas en su mayoría a la generación y enfriamiento de rocas volcánicas extrusivas (SGM, 2007).

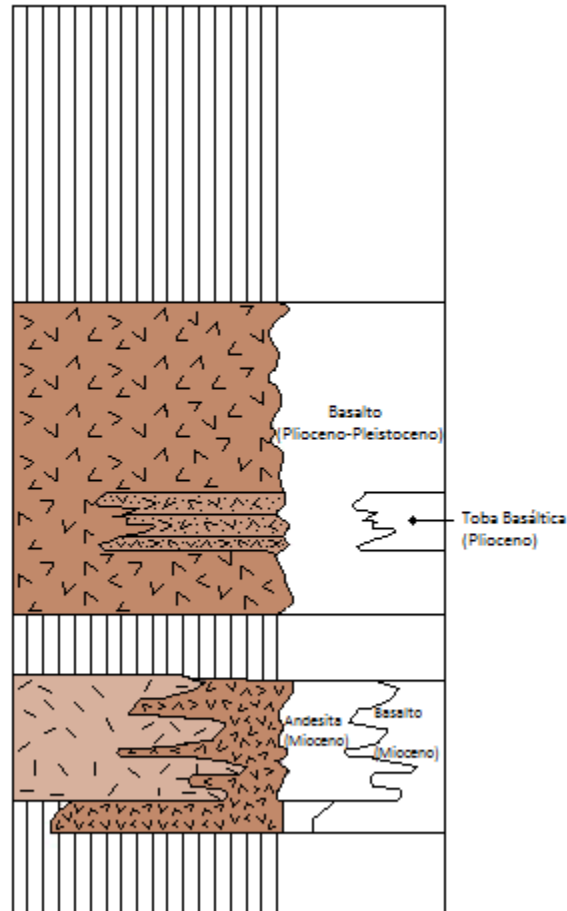


Fig. 4.26. Columna estratigráfica del campo volcánico Palma Sola, compuesto de andesitas y basaltos (SGM, 2017).

4.1.3. Campo Volcánico Los Tuxtlas.

Se localiza al sureste del estado, siendo una provincia independiente a la FVTM. Su composición es de basaltos, andesitas basálticas y tobas basálticas, los flujos pertenecen al Plioceno. Se han descrito petrológicamente las sucesiones volcánicas pero no se han medido espesores; siendo un área poco estudiada, no se cuentan con más datos aparte de los petrológicos y dataciones geoquímicas. Estructuralmente la región es afectada por fallas distensivas con orientación NW-SE y N-S (Verma, et al., 1993).

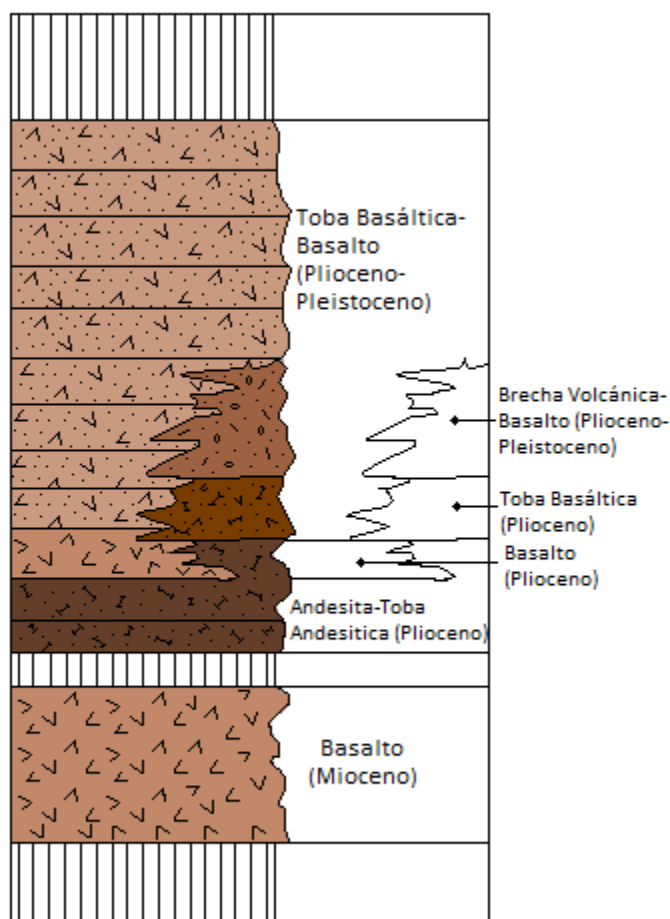


Fig. 4.27. Columna estratigráfica de campo volcánico Los Tuxtlas (SGM, 2017).

4.2. Sitios de posible almacenamiento de CO₂.

En este apartado se proponen sitios de posible almacenamiento de CO₂, siendo un primer acercamiento a sitios que cumplen con algunos de los parámetros para el almacenamiento en basaltos que se abordaron en el capítulo 2, como son espesor, profundidad, porosidad, permeabilidad, poca complejidad estructural en la zona, tectónica estable así como mineralogía, y con base en la información disponible a la fecha, es posible que los sitios explicados en la tabla 2, tengan características interesantes, para almacenar CO₂.

Cabe destacar que la propuesta de estos sitios es con base en la petrología, geología estructural y estratigrafía, en la mayoría de los sitios la falta de información es una constante. En basaltos al ser el atrapamiento principalmente por mineralización, datos como salinidad, composición de agua, pH, porosidad, permeabilidad, presión, temperatura, son importantes para determinar la probabilidad de un almacenamiento exitoso, pero parámetros iniciales como espesor, geología estructural, minerales con los que el CO₂ pueda

reaccionar, permeabilidad de las rocas que actuarían como sello, son esenciales para descartar o incluir sitios para posible almacenamiento de CO₂. Datos como permeabilidades y porosidades solo se encuentran disponibles de forma cualitativa en algunos sitios, y en otros no se encuentran disponibles al público o no se ha estudiado.

El proceso para descartar los sitios se inició con los basaltos que se encuentran en el subsuelo o existe la posibilidad que basaltos en superficie se encuentren en el subsuelo, posteriormente el espesor, fallas existentes que no afectaran a la secuencia de basaltos, tectónica estable (localmente) y en algunos casos con porosidades y/o permeabilidades cualitativas, que para fines de este trabajo es suficiente para acotar los sitios con posible almacenamiento de CO₂.

Tabla 2. Resumen de sitios posibles para almacenamiento de CO₂.

Localización	Litología	Espesor [m]	Elementos estructurales	Permeabilidad	Porosidad
Yecorá, Son	Sucesión de basaltos y riolitas.	800-1000	Fallas normales, no afectan a secuencia máfica.	Media- Alta	Media-Alta.
Madera, Chih. Nácori Chico, Son.	Basaltos.	800-850	Falla normal no afecta a la secuencia máfica.	Baja	*S/D
San Pedro-Ceboruco, Nay.	Basaltos y andesitas.	600-850	Fallas Normales, no todas se encuentran activas.	≈2.0 mD	≈11%
Río Santiago, Jal.	Basaltos-Andesitas basálticas.	≈800	Región activa, fallas normales.	Baja (Rocas que sobreyacen a los basaltos)	*N/D
Chiconquiaco-Palma Sola, Ver.	Basaltos a traquibasaltos muy vesiculares.	>800	Fallas normales	*S/D	*S/D

*S/D: Sin datos, N/D: No disponibles.

A pesar de que la región de Jalisco es activa (ver tabla 1), en estudios realizados en otros países en almacenamiento de carbono se ha logrado caracterizar estructuralmente y permitir el almacenamiento así exista una serie de fallas afectando el área, aunque involucra un mayor monitoreo en el sitio con la posibilidad de almacenamiento.

Como complemento a los parámetros para la selección de sitios de almacenamiento, en la tabla 3, se muestran las emisiones de CO₂ de cada uno de los estados involucrados, el inventario más reciente en los estados es entre 2010-2014.

Estos inventarios son realizados por el departamento de medio ambiente de cada estado o por las delegaciones del INECC, los cuales brindan una visión más amplia de la cantidad de emisiones y su origen.

Con base en los inventarios realizados por los estados, se observa que los estados presentados en la tabla muestran aproximadamente el 25% del total de las emisiones en el país, y con estimaciones presentadas en esos mismos inventarios, para 2020 seguirán aumentando, por lo que es importante conocer sitios de almacenamientos de CO₂ en el país, que ayuden a los sumideros naturales.

Solo en el caso de Nayarit, las emisiones de CO₂ reportadas son pocas, debido a la captación natural de CO₂ en sus ecosistemas forestales y suelos, mientras que en los demás estados las emisiones de CO₂ rebasan la capacidad natural de absorción de este gas.

Tabla 3. Resumen de emisiones de CO₂ de los estados con la posibilidad de almacenar CO₂ en basaltos y estados cercanos.

Estado	Emisiones por sector						Total de emisiones de CO ₂ [Kt]
	Energía	Transporte	Manejo de Residuos	Procesos Industriales	Agricultura y/o ganadería	Silvicultura y otros	
Sonora	11540	7570	1520	3230	3980	-7960	19880
Nayarit	67.2	286.5	*S/D	*S/D	12.7	8.7	375.1
Jalisco	5908	10950	4108	2014	3571	1937	28488
Veracruz	13161.58	9224.91	255.6	≈9723.7	3151.44	11.6	35528.79
CDMX y Zona Metropolitana	*S/D	26983.255	*S/D	9219.776	*N/A	*N/A	36203.031

*S/D: Sin datos, N/A: No aplica.

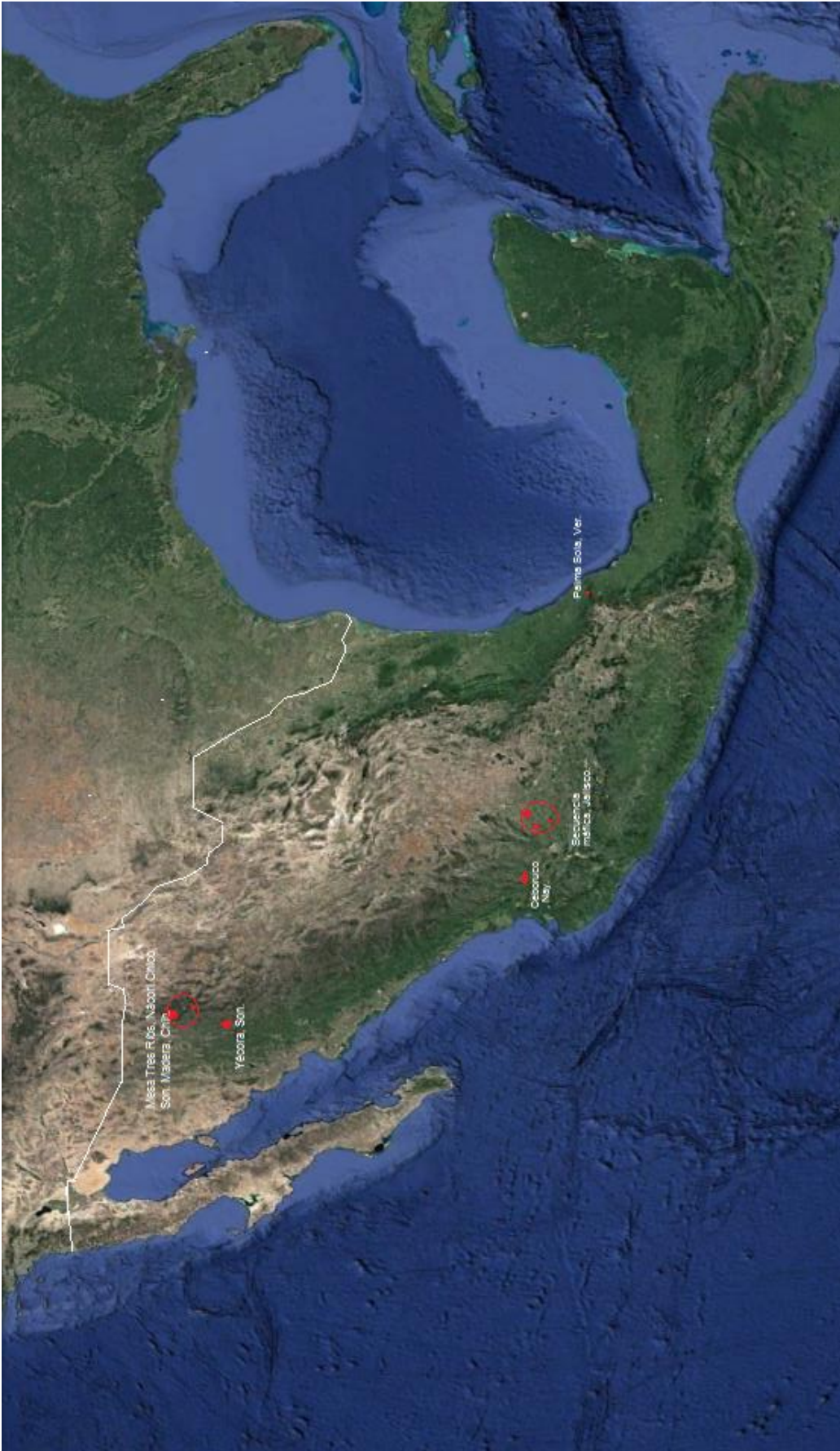


Fig. 4.28. Ubicación aproximada de los sitios posibles de almacenamiento en basaltos en México.

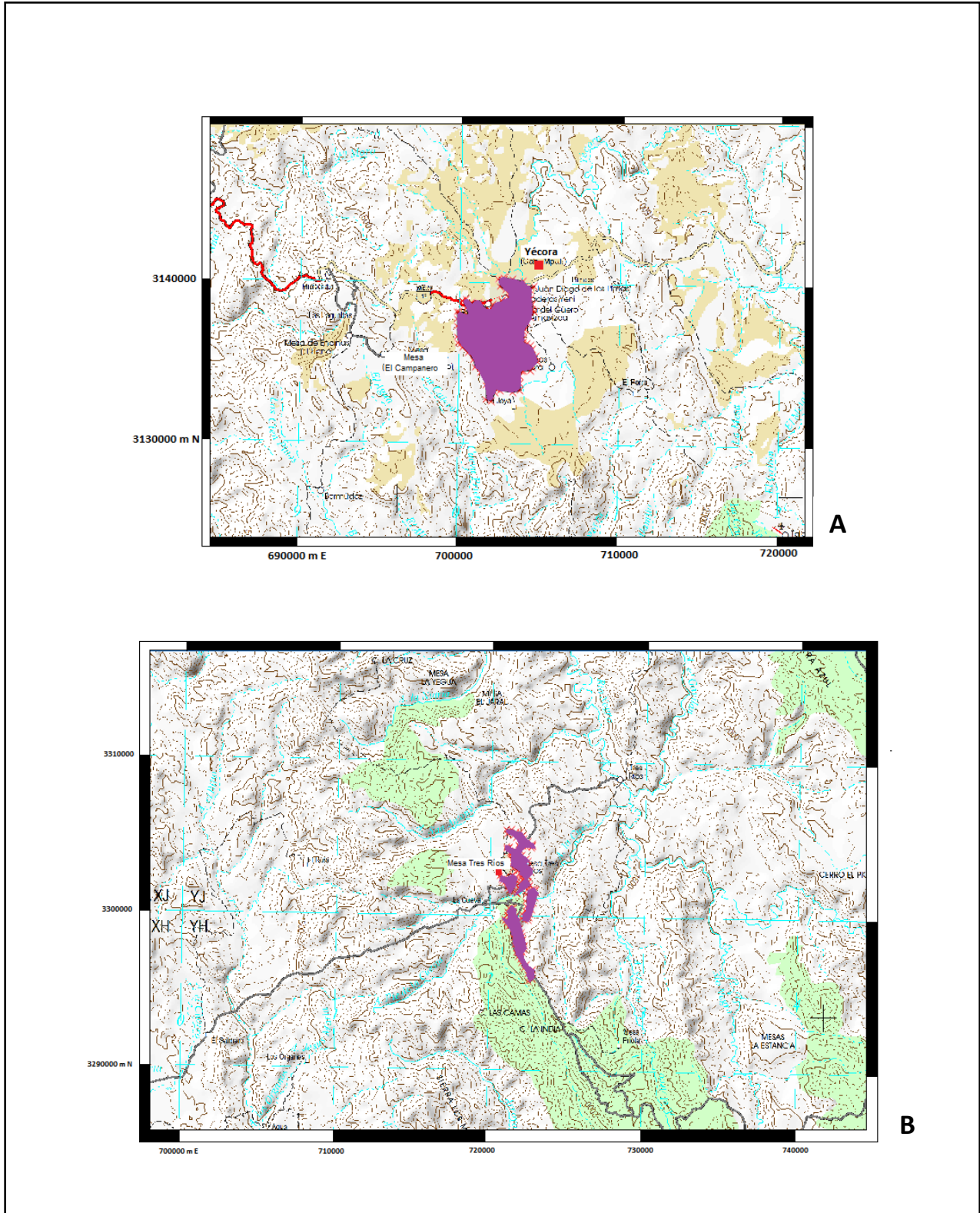


Fig. 4.29. Extensión de basaltos en el área de Sonora. A: Yécora, Sonora. B: Nácori Chico-Madera.

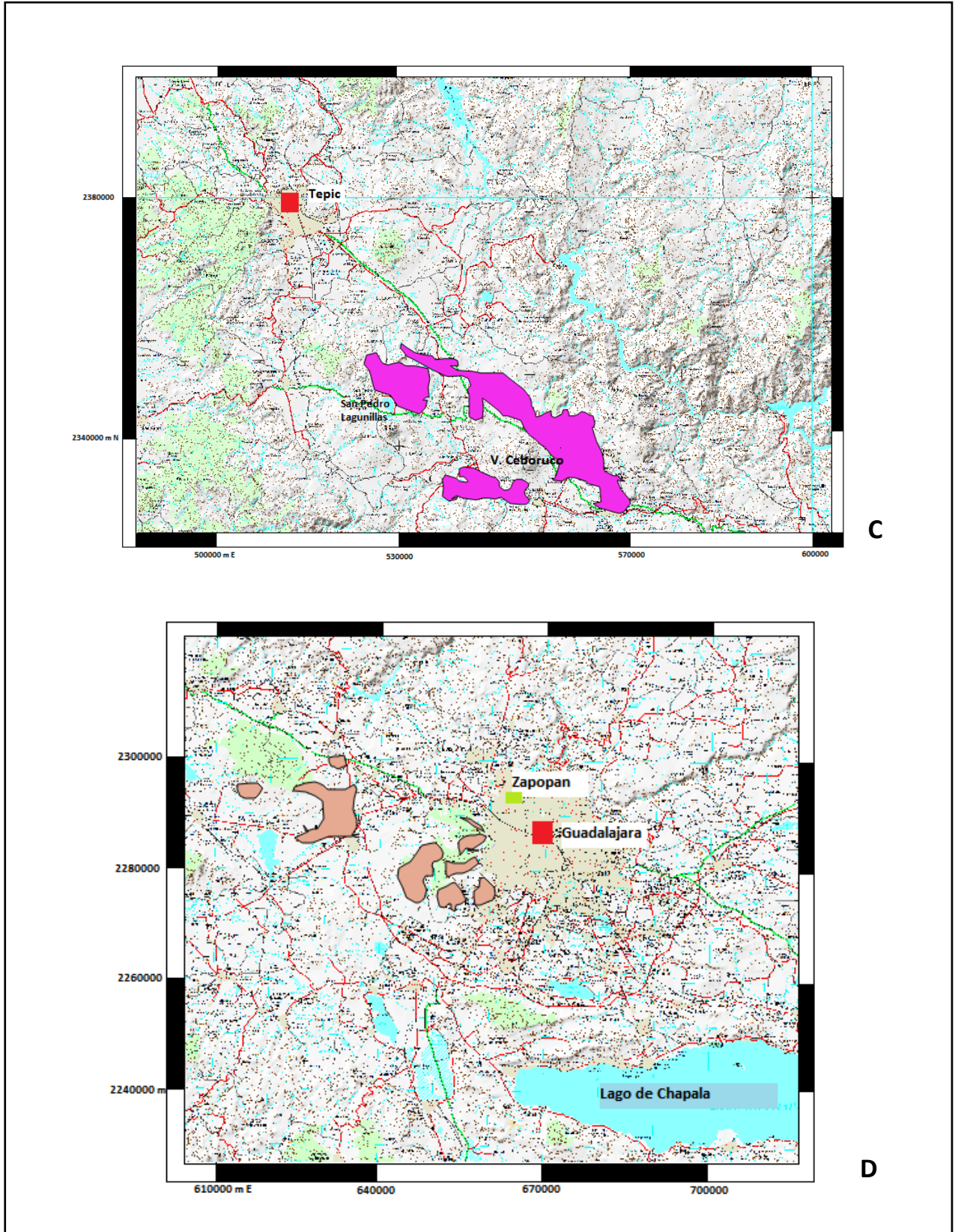


Fig. 4.30. Extensión de basaltos, C: San Pedro-Ceboruco, Nayarit. D: Río Santiago-Caldera La Primavera, Jalisco.

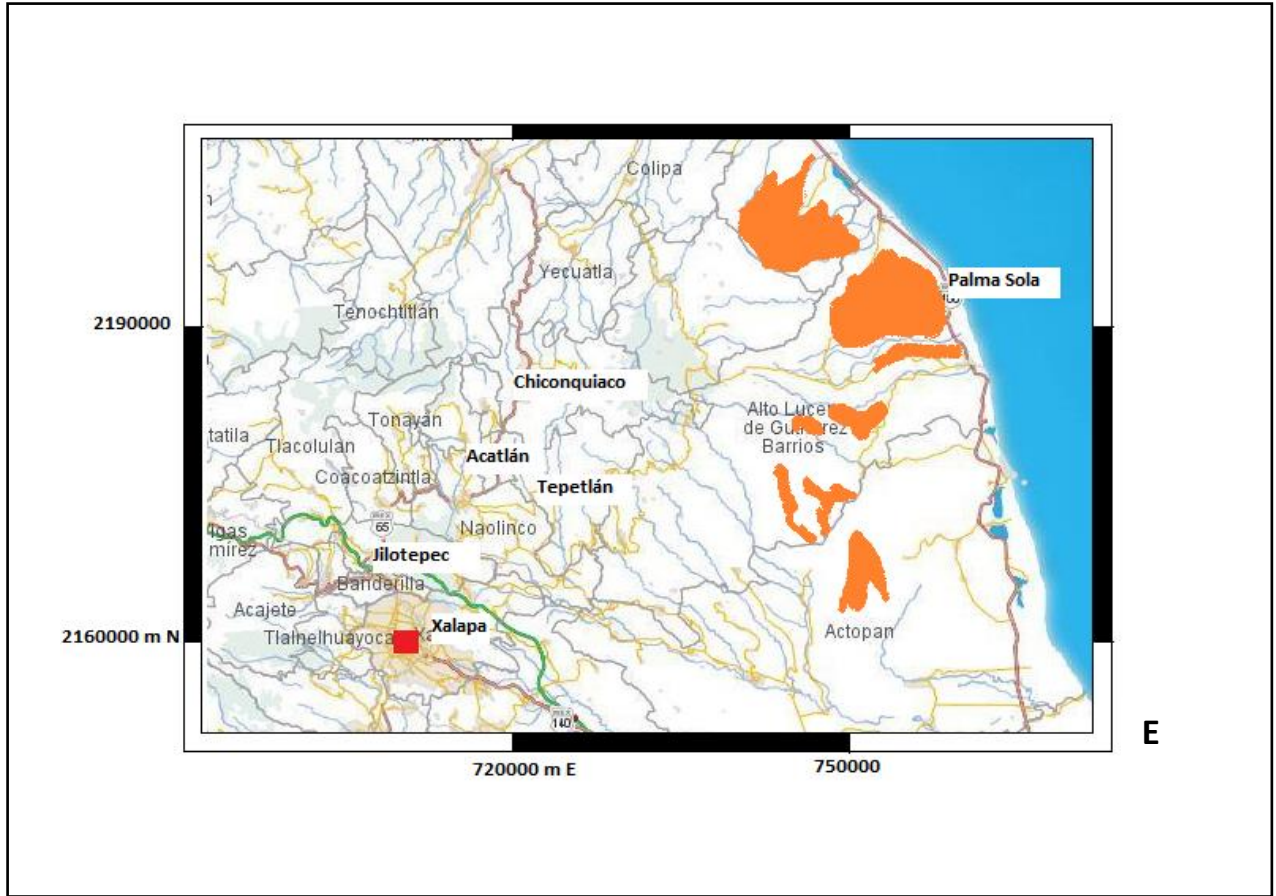


Fig. 4.31. Extensión de basaltos, E: Palma Sola, Veracruz.

4.3. Conclusiones y Recomendaciones.

En México la oportunidad de almacenamiento de CO₂ es diversa, en este trabajo se realizó una recopilación de información disponible de basaltos en México. Los sitios posibles de almacenamiento se concluyen con base en los estudios disponibles y los parámetros necesarios para un almacenamiento seguro y a largo plazo.

Las áreas de Yécora (Sonora), Madera (Chihuahua), San Pedro-Ceboruco (Nayarit), Río Santiago (Secuencia máfica del Mioceno), caldera La Primavera (Jalisco), y Palma Sola (Veracruz), se proponen como sitios posibles para el almacenamiento por mineralización en basaltos, con base en información estructural, tectónica, petrológica y estratigráfica, principalmente. En su mayoría con estudios en superficie realizados por el SGM y otros en el subsuelo realizados por CONAGUA Y CFE.

Este trabajo es un primer acercamiento a sitios con posibilidades de almacenamiento de CO₂ en basaltos en México, acotando las áreas del país que cuentan con basaltos con características interesantes para este fin, siendo una contribución al atlas del mapa de ruta tecnológica de Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂ (CCUS).

En México se cuenta con el antecedente de la realización de pruebas de laboratorio a pequeña escala que comprueban el proceso de formación de carbonatos.

Las emisiones de CO₂ de los sitios propuestos, representan aproximadamente un 17% de las emisiones del país sin contar la ciudad de México y la zona metropolitana, que provienen principalmente del sector energético, industrial y transporte, por lo que de llevar a cabo el almacenamiento de CO₂, representaría una reducción importante de emisiones en estos estados.

Se recomienda realizar estudios a mayor detalle (pruebas de permeabilidad, caracterización estructural a nivel local) de las zonas propuestas en este trabajo, con el fin de descartar o no de manera definitiva el posible almacenamiento de CO₂, debido a que los estudios disponibles de los sitios son escasos y a escala regional.

De ser posible el almacenamiento se recomienda realizar la caracterización del sitio, enfocada a conocer temperatura, presión, salinidad del lugar de inyección y así conocer la capacidad de almacenamiento posible.

El presente trabajo queda a disposición para ser enriquecido a medida que exista más información.

Referencias.

- Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M. (2001). The Amazcala caldera, Querétaro, México. *Geology and geochronology. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, 203-218.
- Aguirre-Díaz, G.J., McDowell, F.W. (1999). Volcanic evolution of the Amealco caldera, central Mexico. *Geological Society of America*, 334, 1-14.
- Alva-Valdivia, L.M., Goguitchaichvili, A., Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Zamorano-Orozco, J.J. (2000). Paleomagnetic data from the Trans-Mexican Volcanic Belt: implications for tectonics and volcanic stratigraphy. *Earth Planet Space*, 52, 467-478.
- Camacho-Rodríguez, P., Paz-Ramírez, P., Mendoza-Pelcastre, S. (2016). Inventario de Emisiones de la CDMX 2014. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. 1-134.
- Carrillo-Martínez, M. (1998). Normal faulting in the Pathé geothermal area, Central Mexico. *Geofísica Internacional*, 37, 103-111.
- Chacón-Anaya, D., Giner, M.E., Vázquez-Valles, M., Maldonado, J.A., Roe, S.M., Anderson, R. (2010). Emisiones de gases de efecto invernadero en Sonora y proyecciones de casos de referencia 1990-2020. EPA y Gobierno de Sonora. 1-118.
- Cochemé, J.J., Demant, A. (1991). Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. *Geology Society of America*, Esp. 254, 81-94.
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Santa Clara (0822), Estado de Chihuahua. 1-18.
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huichapan-Tecozautla (1307), Estado de Hidalgo. 1-41.
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Amealco (2209), Estado de Querétaro. 1-26.
- CONAGUA., SGM. (2009). Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero 2649 Yécora, Estado de Sonora. Organismo de Cuenca Noroeste, 1-27.
- CONAGUA., SGM. (2009). Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero 2655 Nácori Chico, Estado de Sonora. Organismo de Cuenca Noroeste, 1-30.
- COREMI. (1997). Informe final carta geológico-minera y geoquímica, Buenaventura H13-7, Escala 1: 250,000, Estado de Chihuahua. Subgerencia regional Chihuahua, Tomo 1, 1-63.

COREMI. (2003). Informe final carta geológico-minera, Moris H12-D78, Escala 1: 50,000, Estado de Chihuahua. Subgerencia regional Chihuahua, 1-31.

Ferrari, L. (2014). Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology Society of America*, 32, 77-80.

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C.M., Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161-185.

Ferrari, L., Garduño, V.H., Innocenti, F., Manetti, P., Pasquaré, G., Vaggelli, G. (1994). A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Querétaro. *Geofísica Internacional*, 33, 107-123.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., López-Martínez, M., Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Navarro, M., López-Quiroz, P., Luna, L. (2017). Digital Geologic Cartography and Geochronologic Database of the Trans-Mexican Volcanic Belt and Adjoining Areas. *Terra Digitalis*.

Ferrari, L., Pasquaré, G. (1999). Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. *Geological Society of America*, 334, 65-83.

Ferrari, L., Petrone, C. M., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., Venegas-Salgado, S. (2003). Geology of the San Pedro-Ceboruco graben western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 165-181.

Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M.T., Petrone, C.M., Jacobo-Albarra, J., López-Martínez, M. (2005a). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284-306.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S. (2005b). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución al margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 343-378.

Gómez-Tuena, A. (2002). Control temporal del magmatismo de subducción en la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana: Caracterización del manto, componentes en subducción y contaminación cortical (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Tuena, A., Mori, L., Straub, S. M. (2016). Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-Science Reviews*. 1-29.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 229-287.

Guilbaud, M.N., Siebe, C., Layer, P., Salina, S., Castro-Govea, R., Garduño-Monroy, V.H., Le Corvec, N. (2011). Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jorullo volcano region, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and geothermal research*, 201, 97-112.

Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (1988). The La Primavera, Jalisco, Mexico, Geothermal field. *Geothermal Resources Council*, 12, 161-165.

Gutierrez-Negrin, L.C.A., Garduño-Monroy, V.H., Casarrubias-Unzueta, Z. (2000). Tectonic Characteristics of the geothermal zone on Pathé, México. *World Geothermal Congress*, 1189-1193.

Hasenaka, T., Carmichael, I.S.E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central México: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and geothermal research*, 25, 105-124.

Hernández-Pérez, E. (2014). Caracterización hidrogeoquímica, calidad del agua e identificación de áreas de recarga en los acuíferos Amazcala-Buenavista mediante geoquímica e isótopos estables (Tesis maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

Hiriart-Le Bert, G., Gutiérrez- Negrín, L.C.A., Quijano-León, J.L., Ornelas-Celis, A., Espindola, S., Hernandez, I. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Banco Interamericano de desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, 1- 164.

Housh, T.B., Aranda-Gómez, J.J., Luhr, J.F. (2010). Isla Isabel (Nayarit, México): Quaternary alkali basalts with mantle xenoliths erupted in the mouth of the Gulf of California. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 85-107.

Inventario estatal de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. (2014). Gobierno de Jalisco. 1-111.

Rodríguez-Castañeda, J.L., Rodríguez-Torres, R. (1992). Geología estructural y estratigrafía del área entre Guadalajara y Tepic, estados de Jalisco y Nayarit, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 2, 99-110.

Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., López- Martínez, M., Urrutia-Fucugauchi, J. (1997). Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara region and Triple-Junction area, western Mexico. *International Geology Review*, 39, 125-140.

SEMARNAT., Gobierno del Estado de Veracruz. (2018). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. 1-306.

SGM, 1999. Carta Geológico-Minera Madera Clave H12-9, Escala 1:250,000, Estados de Sonora y Chihuahua.

SGM. (2004). Carta Geológico-Minera, Moris H12-D78, Escala 1: 50,000, Estado de Chihuahua.

SGM. (2007). Informe final carta geológico-minera y geoquímica, Yécora H12-D77, Escala 1: 50,000, Estado de Sonora. Subgerencia regional Hermosillo, 1-57.

SGM. (2007). Monografía Geológico- Minera del Estado de Veracruz. 1-130.

SGM. (2017). Monografía Geológico-Minera del Estado de Jalisco. 1-44.

Urrutia-Fucugauchi, J., Alva-Valdivia, L.M., Rosas-Elguera, J., Campos-Enriquez, O., Goguitchaichvili, A., Soler-Arechalde, A.M., Caballero-Miranda, C., Venegas-Salgado, S., Sánchez-Reyes, S. (2000). Magnetostratigraphy of the volcanic sequence Río Grande de Santiago-Sierra de la Primavera región, Jalisco, western Mexico. *Geofísica Internacional*, 39, 247-265.

Verma, S.P., Carrasco-Núñez, G., Milán, M. (1991). Geology and geochemistry of Amealco caldera, Qro., Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 105-127.

Verma, S.P., Salazar, A., Negendank, J.F.W., Milán, M., Navarro, I., Besch, T. (1993). Características petrográficas y geoquímicas de elementos mayores del Campo Volcánico de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Geofísica Internacional*, 32, 237-248.