

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la Factibilidad para la Eliminación de Dióxido de Carbono Mediante la Formación de Carbonatos a través de Basaltos

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Erick Cantú Apodaca

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Ana Paulina Gómora Figueroa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la DGAPA-UNAM, (Proyecto PAPIIT TA-100917; Formación y Estabilidad de Incrustaciones Inorgánicas en Distintos Tipos de Tubería y su Impacto en la Producción de Hidrocarburos).

Índice

Agradecimientos 1

Índice 2

Lista de Figuras 4

Lista de Ecuaciones 5

Lista de Tablas 5

Lista de Gráficas 6

Lista de Esquemas de Reacción 6

Acrónimos y Símbolos 6

1. Justificación 8

2. Antecedentes 9

2.1. ¿Qué es el efecto invernadero? 9

2.2. Problemática 10

2.3. ¿Qué son los gases de efecto invernadero? 14

2.4. ¿Cuáles son los gases de efecto invernadero? 15

2.5. Generación de gases de efecto invernadero provenientes de actividades humanas en México 22

2.5.1. Por procesos industriales 23

2.5.2. Agricultura 24

2.5.3. Uso del suelo, cambio del suelo y silvicultura 24

2.5.4. Desechos 24

2.5.5. Generación de Energía 25

2.6. Dióxido de carbono como gas de efecto invernadero y sus propiedades. 29

2.7. Mapa de la ruta tecnológica en México 32

3. Hipótesis y Objetivos 41

3.1. Hipótesis 41

3.2. Objetivos 41

4. Proyecto CarbFix en Islandia 42

4.1. Introducción 42

4.2. Datos de las instalaciones de la planta Hellisheidi y de las utilizadas para el proyecto CarbFix 44

4.3. Toma de muestras y recolección de datos antes de la inyección de CO_2 47

4.4. Plan de monitoreo del proyecto CarbFix 49

4.5. Inyección de CO_2, resultados y datos obtenidos 50

4.6. Costos del proyecto CarbFix 57
4.7. Conclusiones del proyecto CarbFix 60
5. Toma y análisis de muestras 62
5.1. Análisis de Muestras Recolectadas. 69
5.1.1. Láminas Delgadas y Análisis Petrográfico. 70
5.1.1.1. Análisis Petrográfico de Tlax-03. 73
5.1.1.2. Análisis Petrográfico de Tlax-05. 75
5.1.2. Resultados de análisis de Difracción de Rayos X de Polvos. 77
5.1.3. Resultados de análisis de Fluorescencia de Rayos X. 78
5.1.4. Inyección de CO_2 en una muestra de basalto 80
5.1.4.1. Sistema de burbujeo de CO_2 81
5.1.4.2. Limpieza de muestras 82
5.1.4.3. Burbujeo de CO_2 en basaltos sumergidos en agua 82
5.1.4.4. Análisis de sólidos disueltos 84
5.1.4.5. Determinación de la Porosidad de la Roca 89
5.1.4.6. Determinación de la integridad mecánica de la celda 90
5.1.4.7. Resumen de los experimentos realizados 91
6. Conclusiones y Recomendaciones 92
7. Bibliografía 93
Apéndice 96

Lista de Figuras

Figura 1.- Posición de la capa de Ozono dentro de la atmósfera de la Tierra.[4] 10
Figura 2.- Imagen del océano Ártico en septiembre de 1984.[8] 11
Figura 3.- Imagen del océano Ártico en septiembre de 2016.[8] 12
Figura 4.- Fotografía del Glaciar Qori Kalis en Perú, tomada en 1978.[8] 13
Figura 5.- Fotografía del Glaciar Qori Kalis en Perú, tomada en 2011.[8] 13
Figura 6.- Al momento en que la radiación UV quita la molécula de cloro ya sea de los CFCs o de los HCFCs, el átomo de cloro (Cl) se combina con una molécula de ozono (O_3) lo cual provoca que el ozono se convierta en oxígeno, liberándose después para volver a combinarse con otras moléculas de ozono y así sucesivamente, teniendo en promedio un átomo de cloro la capacidad de destruir hasta 100,000 moléculas de ozono. El proceso se detiene cuando el átomo de cloro se mezcla con algún compuesto químico que lo neutraliza.[25] 19
Figura 7.- Esquema de los principales componentes del ciclo natural del carbono. Los valores representan los peta gramos de CO_2 producidos o tomados por diferentes partes del sistema al año (Pg/año).[30] 31
Figura 8.- Esquema de las perturbaciones causadas en el ciclo del carbono debido a actividades humanas. Los valores representan los peta gramos de CO_2 producidos o tomados por diferentes partes del sistema al año (Pg/año).[30] 31
Figura 9.- Principales fuentes fijas emisoras de gases de efecto invernadero en México.[1] 33
Figura 10.- CarbFix está conectado con la planta geotérmica Hellisheidi al suroeste de Islandia. El sitio de inyección de CarbFix se encuentra en la parte derecha de la figura.[31] 42
Figura 11.- Diagrama de la inyección de CO_2 y agua a la formación basáltica.[33] 44
Figura 12.- Diagrama simplificado de la estación de separación de gas operada por la planta de energía en Hellisheidi, Islandia.[34] 45
Figura 13.- Mapa de la distribución del pozo inyector, los de monitoreo, la planta Hellisheidi y la fuente de agua.[35] 46
Figura 14.- Toma de muestras en el pozo HN-01 durante el invierno.[35] 48
Figura 15.- Diagrama del subsuelo en el sitio de inyección del proyecto CarbFix.[32] 49
Figura 16.- Imágenes de microscopía electrónica de diópsidos aplastados con la precipitación secundaria de calcita.[33] 53
Figura 17.- Línea de tiempo de la etapa experimental del proyecto CarbFix.[33] 56
Figura 18.- Mapa geológico simplificado de la faja volcánica Transmexicana.[37] 63
Figura 19.- Mapa geológico simplificado de la faja volcánica Transmexicana, zona de interés para la recolección de muestras.[37] 64
Figura 20.- Arroyo donde se recolecto la primer muestra de basalto. 65
Figura 21.- Lugar donde se tomaron las muestras 5 y 6. 66
Figura 22.- Localización de los puntos de recolección de basaltos en el mapa de la faja volcánica Transmexicana. 69
Figura 23.- Imagen de los diferentes tipos de lámina delgada que se pueden crear.[38] 71
Figura 24.- Fotografía de las láminas delgadas adquiridas para cada muestra de basalto. 72
Figura 25.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-03. 73
Figura 26.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-03'. 74
Figura 27.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles paralelos de la lámina Tlax-03. 74
Figura 28.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax5'. 75
Figura 29.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-05. 76
Figura 30.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-05. 76
Figura 31.- Esquema del sistema de burbujeo de CO_2 utilizado. 81
Figura 32.- Muestras Tlax-05 a la izquierda y Tlax-03 a la derecha después su limpieza. 82
Figura 33.- Fotografía del CO_2 siendo burbujeado en la muestra de roca de basalto sumergida en agua destilada. 84
Figura 34.- Estructura del EDTA.[41] 85
Figura 35.- Dispositivo empleado para la determinación de iones de Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+} 86
Figura 36.- Muestras de Tlax-03 después de agregar fenolftaleína. 87

Figura 37.- El EDTA atrapa los iones divalentes presentes en la disolución M = a Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+}. *87*
Figura 38.- Fotografía de la celda cilíndrica restaurada. *90*
Figura 39.- Orden cronológico de las actividades realizadas durante este trabajo. *91*

Lista de Ecuaciones

$TgCO2eq = Gg\ de\ gas * PCG1000 \cdots\cdots\cdots (1)$ *15*
$CO2\ g \rightarrow CO2\ aq \cdots\cdots\cdots (2)$ *17*
$CO2g + H2O\ l \rightarrow H2CO3\ aq \cdots\cdots\cdots (3)$ *17*
$H2CO3 \leftrightarrow H + + HCO3 \quad Ka1 = 4.2 \times 10 - 7 \cdots\cdots\cdots (4)$ *18*
$HCO3 \leftrightarrow H + + CO32_ \quad Ka2 = 4.8 \times 10 - 11 \cdots\cdots\cdots (5)$[19] *18*
$CO2 = j = 1n\ Combustiblej \times FEj \times FOj \times 4412 \cdots\cdots\cdots (6)$ *28*
$Gasi = j = 1n(\ Combustiblej \times FEij\ ) \cdots\cdots\cdots (7)$ *29*
$r = AA(-EART)ai(1 - exp - ART \cdots\cdots\cdots (8)$ *54*
$50\ ml\ EDTA * 0.01\ mol 1{,}000\ ml = 0.0005\ mol * 292.24\ gmol = 0.14612\ g \ldots\ldots\ldots (9)$ *85*
$100\ ml\ Solución\ Borax * 0.025\ mol 1{,}000\ ml * 381.37\ gmol = 0.954325\ g \ldots\ldots\ldots (10)$ *85*
$36.6\ ml\ NaOH * 0.1\ mol 1{,}000\ ml * 39.99714\ gmol = 0.1463895\ g \ldots\ldots\ldots (11)$ *85*
$0.86\ g\ EDTAml * .875\ ml\ EDTA = .7525\ g\ Utilizados\ de\ EDTA \ldots\ldots\ldots (12)$ *88*
$0.7525\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Ca 1\ mol\ EDTA * 40\ gmol\ Ca = 0.1030\ g\ de\ Ca \ldots\ldots\ldots (13)$ *88*
$0.7525\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Mg 1\ mol\ EDTA * 24\ gmol\ Mg = 0.0618\ g\ de\ Mg \ldots\ldots\ldots (14)$ *88*
$0.7525\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Fe 1\ mol\ EDTA * 56\ gmol\ Mg = 0.1442\ g\ de\ Fe \ldots\ldots\ldots (15)$ *88*
$0.86\ g\ EDTAml * 1.1\ ml\ EDTA = .946\ g\ Utilizados\ de\ EDTA \ldots\ldots\ldots (16)$ *88*
$0.946\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Ca 1\ mol\ EDTA * 40\ gmol\ Ca = 0.1295\ g\ de\ Ca \ldots\ldots\ldots (17)$ *88*
$0.946\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Mg 1\ mol\ EDTA * 24\ gmol\ Mg = 0.0777\ g\ de\ Mg \ldots\ldots\ldots (18)$ *88*
$0.946\ g\ EDTA * 1\ mol\ EDTA 292.24\ g * 1\ mol\ Fe 1\ mol\ EDTA * 56\ gmol\ Mg = 0.1813\ g\ de\ Fe \ldots\ldots\ldots (19)$ *89*

Lista de Tablas

Tabla 1.- PCG en relación al CO_2 para algunos gases de efecto invernadero (CFC-12 y HCFC-21 son ejemplos de clorofluorocarbonos e hidroclorofluorocarbonos respectivamente).[3] *15*
Tabla 2.- PCG en relación al CO_2 para algunos gases de efecto invernadero y algunos clorofluorocarbonos.[22] ... *21*
Tabla 3.- Comparación de las emisiones por uso de combustibles en 1990 y 2010.[28] *26*
Tabla 4.- Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero en 1990 y 2010.[28] *27*
Tabla 5.- Factores de oxidación para diferentes combustibles.[28] *28*
Tabla 6.- Emisiones fugitivas de metano (Gg de CO_2 eq).[28] *29*
Tabla 7.- Composición química de los minerales de mayor interés contenidos en la base datos termodinámica desarrollada para el proyecto CarbFix.[33] *55*
Tabla 8.- Información Financiera del proyecto CarbFix del año 2006 al 2011. ..... *57*
Tabla 9.- Resumen de las propiedades de los basaltos y mapa de su lugar de recolección, de Tlax01 a Tlax03. ..... *67*
Tabla 10.- Resumen de las propiedades de los basaltos y mapa de su lugar de recolección, de Tlax04 a Tlax07. ..... *68*
Tabla 11.- Composición aproximada, en porcentaje de las rocas. *77*
Tabla 12.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-03. ..... *79*
Tabla 13.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-05. ..... *80*
Tabla 14.- pH del agua destilada con las muestras sumergidas y peso de cada muestra de roca antes de ser sumergida. *83*
Tabla 15.- Valor en MXN de los costos reportados en el proyecto CarbFix de 2006 a 2011. ..... *92*

Lista de Gráficas

Gráfica 1.- Contribución de emisiones de GEI por categoría, 2010.[28] 22
Gráfica 2.- Contribución de emisiones de GEI generados en el sector energético, 2010.[28] 23
Gráfica 3.- Comparación de difracción de rayos-X de polvo entre Tlax-03 (verde) y Tlax-05 (azul). 78
Gráfica 4.- Comparación de la capacidad de adsorción que tiene Tlax03, tanto la muestra de roca como el polvo de ésta. 89

Lista de Esquemas de Reacción

Esquema de reacción 1.- Disolución y disociación de CO_2 en agua. 43
Esquema de reacción 2.- Disolución mineral de basaltos. 43
Esquema de reacción 3.- Precipitación mineral.[32] 43

Acrónimos y Símbolos

atm – Atmósferas de Presión
Bar – Unidades de presión
CCS – Carbon Capture and Sequestration
CCUS – Carbon Capture, Use and Storage
CFE – Comisión Federal de Electricidad
CH_4 – Metano
CMM – Centro Mario Molina
CO – Monóxido de Carbono
CO_2 – Dióxido de Carbono
CO_2eq – Dióxido de Carbono Equivalente
COVDM – Compuestos Orgánicos Volátiles Diferentes del Metano
EDTA – Ácido Etilendiamino-Tetra-Acético
EOR – Enhanced Oil Recovery
g – gramos
g/mol – Unidades de masa molecular
GEI – Gases de Efecto Invernadero
Gg – Gigagramos
H_2 – Hidrógeno
H_2CO_3 – Ácido Carbónico
H_2S – Ácido Sulfhídrico
HFCs – Hidrofluorocarbonos
IPN – Instituto Politécnico Nacional
ISOR – Iceland Geosurvey
km – kilómetros
LBNL – Lawrence Berkeley National Laboratory, USA
M – Molar
Ma – Millones de años
mg – mili gramos
mL – mililitros
mm – milímetro
Mannvit – Mannvit Engineering, Iceland
MRT – Mapa de la Ruta Tecnológica
MW – Mega Watts

N_2O – Óxido Nitroso
nm – nanómetros
NO – Monóxido de nitrógeno
NO_x – Óxidos de Nitrógeno
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
O_2 – Oxígeno
O_3 – Ozono
OR – Orkuveita Reykjavíkur
PCG – Potencial de Calentamiento Global
PEMEX – Petróleos Mexicanos
PFCs – Perfluorocarbonos
pH – Potencial de Hidrógeno
PJ – Peta Joule
ppm – Partes Por Millón
SEMARNAT – Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER – Secretaría de Energía
SF_6 – Hexafluoruro de Azufre
SHCP – Secretaría de Hacienda y Crédito Público
Tg – Teragramos
UNAM – Universidad Nacional Autónoma de México
UV – Ultra Violeta
WHO – World Health Organization
°C – Grados centígrados
μm – micrómetros

1. Justificación

Con el aumento de la población en las últimas décadas, no sólo a nivel nacional sino a nivel mundial, el uso del transporte, la generación de desechos (basura), las actividades agrícolas, la industria y por consiguiente el consumo de energía han aumentado de manera drástica, provocando un aumento considerable en las emisiones de CO_2.

El CO_2 se conoce como un gas de efecto invernadero, y se caracterizan por su contribución al calentamiento de la corteza terrestre, mediante la retención de calor.

En México la mayor cantidad de emisiones de CO_2 provienen de la generación de energía eléctrica, lo que equivale a aproximadamente el 21% de las emisiones totales, de las cuales el 20.4% proviene del transporte, 8% de la manufactura e industria de la construcción, 9% de procesos industriales, 9.9% del uso de suelo y el resto proviene de otros consumos.[1]

En el 2014, a través de la Secretaría de Energía de México, se conformó y oficializó el mapa de la ruta tecnológica de Captura, Uso y Almacenamiento de CO_2 (CCUS, por sus siglas en inglés –carbon capture, use and storage), en el cual se plantea el ordenamiento de los esfuerzos dirigidos a la articulación de actividades de investigación en temas de captura, transporte, uso y almacenamiento de CO_2 con la intención de optimizar su desarrollo e implementación de esta tecnología. Por lo tanto, se requiere desarrollar proyectos que atiendan las necesidades de dicha ruta.[1]

En este proyecto de tesis se propone el estudio y análisis técnico de la factibilidad de eliminación permanente de dióxido de carbono, a través de la inyección de CO_2 en formaciones de basaltos y su posterior transformación en carbonatos.

2. Antecedentes

2.1. ¿Qué es el efecto invernadero?

Un invernadero tiene la finalidad de cultivar plantas, éste consiste de un lugar cerrado que generalmente tiene una cubierta traslúcida de vidrio o plástico, lo que permite la entrada de radiación solar. Cuando la radiación entra al invernadero, una parte en forma de luz visible es capaz de reflejarse a través de la cubierta, mientras que la parte de radiación infrarroja queda atrapada debido a que no puede atravesar la cubierta de vidrio o cristal, generando así un aumento de temperatura en el ambiente dentro del invernadero. De esta manera se regula la temperatura interna del invernadero para obtener mejores cultivos.[2]

En nuestro planeta ocurre un fenómeno que se da de manera natural llamado "efecto invernadero", llamado así debido al proceso antes explicado. Este fenómeno comienza con la emisión de ondas solares que emiten radiación a aproximadamente 6,000 grados centígrados (°C) desde la superficie del sol. Debido a la distancia que existe entre el Sol y la Tierra y también debido al albedo[I], la intensidad de la radiación solar disminuye dándole una temperatura promedio a la superficie terrestre de –18 °C.[3] Cabe mencionar que también la capa de ozono[II] interfiere en este proceso, ya que de no ser por ésta, las condiciones de temperatura en la superficie terrestre serían diferentes, es decir, por una parte funciona como filtro de la radiación solar ultravioleta (UV-B)[III], absorbiendo completamente la radiación tipo UV-C (radiación con banda de longitud de onda menor a 280 nm), sin embargo, no filtra en la radiación UV-A (radiación con banda de longitud de onda entre 320 y 400 nm), lo que da como resultado que la radiación UV-B y C no lleguen a la superficie terrestre, permitiendo que entre la del tipo UV-A. Si no existieran los 3 tipos de radiación llegarían de manera directa a la superficie terrestre cambiando por completo las condiciones de temperatura ates mencionadas.

De manera similar a lo que ocurre en un invernadero, ciertos gases que se encuentran en la atmósfera funcionan como la cubierta de vidrio, permitiendo la entrada de radiación solar a la Tierra, pero una vez que ésta llega a la superficie terrestre una parte se refleja fuera de la atmósfera y la otra es atrapada debido a la presencia de los gases de efecto invernadero. Esta retención de radiación solar es la causante de que la temperatura de la superficie terrestre sea mayor a la antes mencionada, dando como resultado una temperatura promedio de 14.6 °C.[5]

Este fenómeno es indispensable para la vida en la superficie terrestre, sin embargo, el aumento de gases de efecto invernadero durante las últimas décadas ha provocado que una mayor cantidad de radiación solar quede atrapada en la superficie terrestre, resultando en un aumento de temperatura en la corteza terrestre. Este aumento de temperatura cada vez es mayor, por ejemplo, en junio de 2015 la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA por sus siglas en inglés), reportó una temperatura promedio de 16.33 °C, rompiendo la marca máxima previa.[5]

[I] Se refiere a la blancura de un planeta, siendo su capacidad para reflejar radiación.[43]
[II] Zona de la estratosfera terrestre que contiene una concentración relativamente alta de ozono, se extiende aproximadamente de los 15 a los 50 Km sobre la superficie de la Tierra y reúne aproximadamente el 90% del ozono presente en la atmósfera.[25]
[III] La radiación UV-B es un tipo de radiación electromagnética con longitud de onda menor a la radiación visible (luz), se encuentra dentro de los 280 y 320 nm. Este tipo de radiación es dañina para el ADN, provoca melanomas y otros tipos de cáncer de piel.[25]

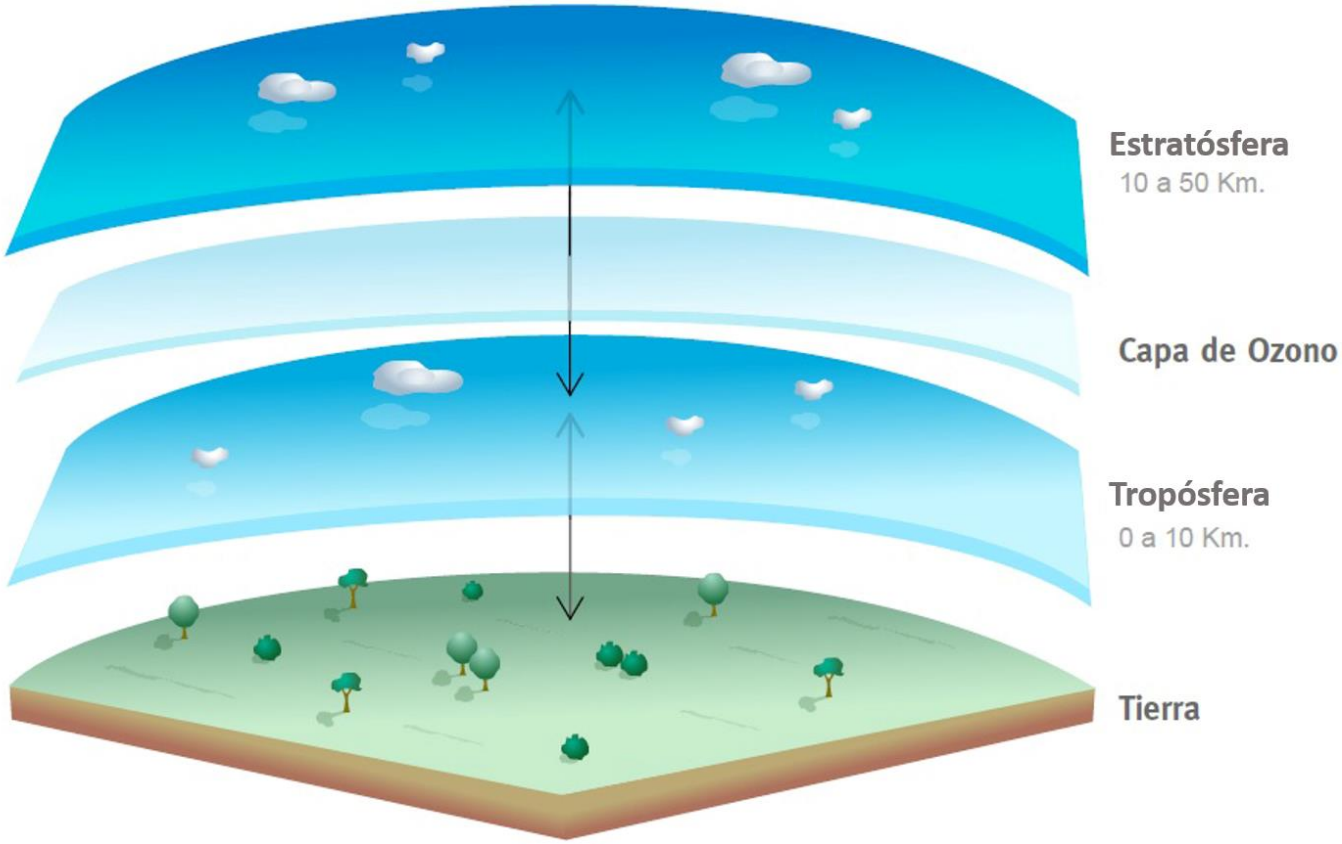


Figura 1.- Posición de la capa de Ozono dentro de la atmósfera de la Tierra.[4]

2.2. Problemática

El aumento de temperatura en la corteza terrestre no sólo ha provocado el cambio climático en todo el mundo, sino también ha derivado en una enorme cantidad de problemas directos e indirectos al planeta. El cambio climático consiste en una variación en los fenómenos climáticos que ocurren de manera natural en el planeta.

Dentro de las principales consecuencias del cambio climático se encuentran:

- El derretimiento de los polos y por consiguiente un aumento en el nivel del mar (de entre 10 y 20 centímetros durante siglo XX), causando la desaparición de algunas ciudades o islas en todo el mundo.

- Con el aumento de temperatura, se prevé el comienzo de un proceso de desertificación en zonas continentales interiores, tales como: Asia central, el Sahel africano y grandes llanuras en Norte-América.

- Como efecto secundario a la desertificación de grandes superficies terrestres y la desaparición de otras debido al aumento del nivel del mar, se estima una disminución en la producción agrícola y, por consiguiente, también una disminución en el suministro de alimentos.

- Alteraciones en los ecosistemas de todo el mundo, generando extinciones tanto de especies animales como vegetales, además de la migración de especies animales.

- Debido al aumento de los gases de efecto invernadero, no sólo aumentan los efectos del cambio climático, sino que también se crea una reducción en la calidad del aire que los seres vivos del planeta requieren.[6]

- Se cree que la fuerza de huracanes recientes (Irma y Harvey) también son producto del calentamiento global, ya que los huracanes se desarrollan y crecen con aumentos en la temperatura del océano. La combinación de este aumento de temperatura y del nivel del mar provocarían oleadas de tormentas y lluvias cada vez más fuertes.[7]

El cambio climático afecta a todo el planeta, incluyendo Polo Norte y Polo Sur, además de las zonas intermedias. Esto no es algo que ocurrirá en los siguientes años, es algo que viene ocurriendo desde hace algunos años, comenzando con aumentos de temperatura que han causado grandes deshielos en las zonas polares del planeta. También han cambiado los patrones de precipitaciones, es decir, en donde ocurrían ciertos fenómenos meteorológicos de manera constante cada vez ocurren menos, o en lugares donde no se presentaban cierto tipo de fenómenos con frecuencia ahora ocurren cada vez más, resultando en migraciones de muchas especies animales y en la extinción de algunas otras especies tanto animales y como vegetales.[3]

En todo el mundo se ha registrado el derretimiento de hielo, no sólo en los polos, sino también se han visto afectados glaciares montañosos como el de Neumayer o el del parque nacional de Montana, las láminas de hielo que cubren el oeste de la Antártida y Groenlandia y el hielo del mar Ártico. Investigadores han registrado descensos en la población de varias especias que habitaban estas zonas como los pingüinos y osos polares.

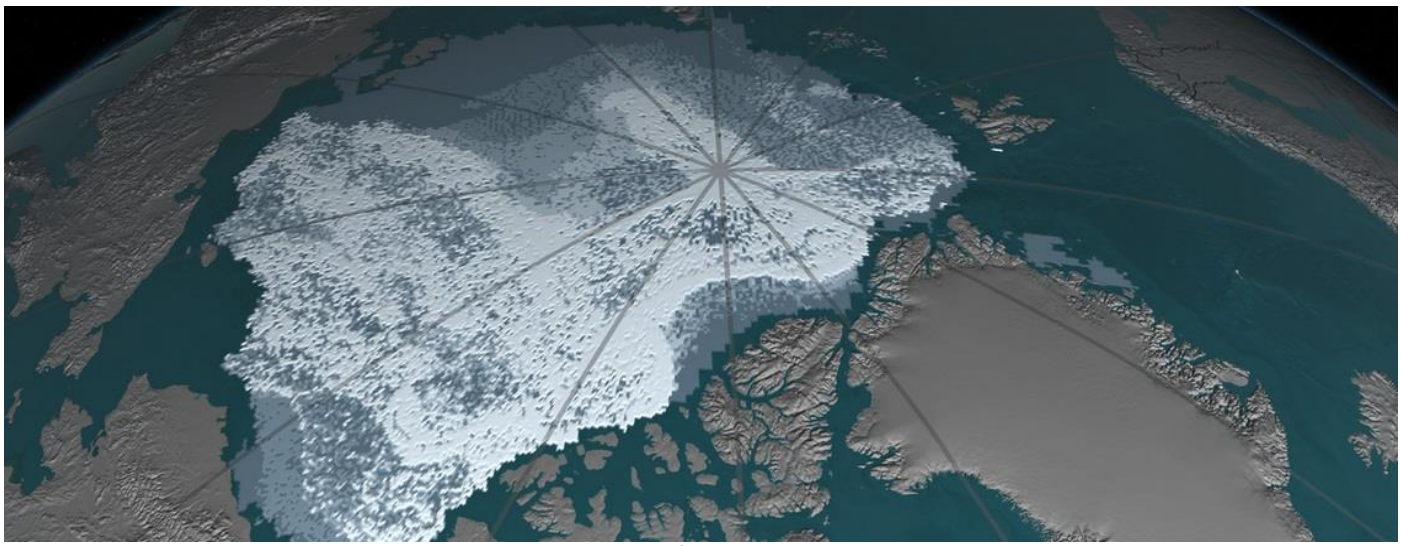


Figura 2.- Imagen del océano Ártico en septiembre de 1984.[8]

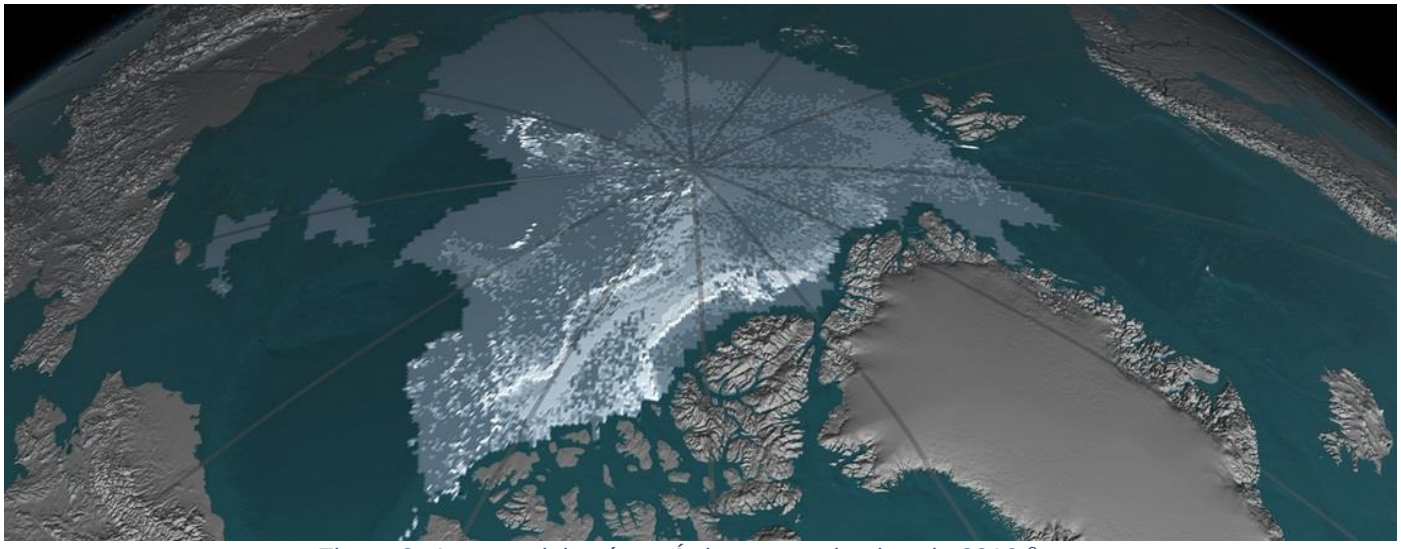


Figura 3.- Imagen del océano Ártico en septiembre de 2016.[8]

Las imágenes anteriores muestran la reducción del casquete polar durante el periodo de septiembre de 1984 a septiembre de 2016.

Otra consecuencia de los deshielos es el aumento del nivel del mar, que ha sido más rápido durante el último siglo, causando migración de algunas especies a zonas más elevadas o más frías. La media de las precipitaciones (lluvia y nieve) ha aumentado en todo el planeta. Otro ejemplo de los cambios que hasta el día de hoy ha causado el calentamiento global son los escarabajos del abeto en Alaska que al experimentar 20 años de veranos más cálidos han aumentado su población de manera considerable y como consecuencia devorado aproximadamente 4 millones de acres de abetos durante este lapso.

De no cambiar la situación actual y continuar con el incremento de la emisión de gases de efecto invernadero, se espera que, durante este siglo, el nivel del mar aumente entre 18 y 59 centímetros. Adicionalmente, si los polos continúan derritiéndose se podrían aumentar entre 10 y 20 centímetros adicionales.

Se estima también que algunos fenómenos como los huracanes y algunas tormentas aumenten su intensidad. Algunas especies que son co-dependientes podrían perder sincronización y afectar ecosistemas enteros. En algunos lugares del planeta las inundaciones serían más frecuentes y en otras zonas las sequias serían más frecuentes.

La disponibilidad de agua dulce cada vez será menos ya que zonas como Quelccaya en Perú, la gente utiliza las capas de hielo cerca para proveerse de agua potable y se estima que para el año 2100 dicha capa podría desaparecer por completo.[9]



Figura 4.- Fotografía del Glaciar Qori Kalis en Perú, tomada en 1978.[8]



Figura 5.- Fotografía del Glaciar Qori Kalis en Perú, tomada en 2011.[8]

Como puede observarse en las fotografías anteriores, en poco más de 30 años el glaciar Qori Kalis se ha derretido casi por completo debido al aumento de temperatura registrado en la zona.

Las consecuencias del cambio climático de manera directa sobre el agua son: aumento generalizado en caudales y adelantos temporales en las descargas de ríos aumentados con glaciares y nieve, aumento en la temperatura de lagos y ríos en muchas regiones lo que alteraría directamente la estructura térmica y la calidad del agua y la acidificación de los océanos debido a la absorción de CO_2 proveniente de fuentes antropogénicas.

Lo anterior afecta de manera directa a los seres vivos con adelantos en los comienzos primaverales y como consecuencia los procesos de floración, migraciones y puestas de huevos, desplazamiento hacia regiones más aptas para vivir de algunas especies y la extinción aquellas incapaces de migrar, alteración en el volumen de algas, plancton y peces en océanos de latitudes altas y una migración más temprana de peces en ríos y cambios en los límites de estas migraciones.

Para los humanos también se presentarían algunos efectos como: aumento en la mortalidad asociado a las olas de calor, incremento de algunas enfermedades infecciosas, aumento en la malnutrición debido a sequías y al desequilibrio estacional de las cosechas e incluso aumento de enfermedades debidas a cambios en la composición de acuíferos.[10]

2.3. ¿Qué son los gases de efecto invernadero?

Los gases de efecto invernadero son todos aquellos que tienen la capacidad de impedir que la radiación que entra a la superficie de la Tierra sea reflejada hacia el espacio, provocando el aumento de la temperatura. Los gases de efecto invernadero se encuentran de manera natural en la atmósfera, pero también pueden ser generados a partir de ciertas actividades de origen humano, mejor conocidas como antropogénicas.

La capacidad de cada gas para impedir que la radiación sea reflejada depende de su estructura molecular y el tiempo de residencia en la atmósfera antes de ser transformado en otro compuesto. Entre más compleja sea su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su potencial para impedir la salida de la radiación y por tanto mayor será el incremento de temperatura en el planeta.[3]

Los gases de efecto invernadero se dividen en 2 tipos; los de efecto directo y los de efecto indirecto. Los de efecto indirecto, son los gases que a través de reacciones químicas producen gases de efecto directo e influyen en la destrucción y formación de la capa ozono. Dichos gases influyen en la concentración de otros gases de efecto invernadero y en su tiempo de vida en la atmósfera. Un ejemplo de un gas de efecto indirecto es el ozono (O_3), que se crea naturalmente en la tropósfera como consecuencia de reacciones químicas entre el oxígeno (O_2) y la radiación solar, puede atrapar esta radiación y filtrar radiación ultravioleta.

Entre los gases de efecto indirecto también se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2) y los compuestos orgánicos volátiles no metálicos que pueden formar ozono y partículas suspendidas en zonas urbanas.

Los gases de efecto directo son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), el hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFCs) y los perfluorocarbonos (PFCs). A diferencia de los gases de efecto indirecto, los gases de efecto directo se les asigna un valor llamado “Potencial de Calentamiento Global” (PCG). El potencial de calentamiento global con respecto al tiempo, considerando un escenario de 100 años de acuerdo con la norma internacional. El gas utilizado como referencia es el CO_2, y el PGC establece cuantos gramos de CO_2 equivalen a un gramo de otra especie. En la siguiente tabla se muestran algunos gases y su Potencial de Calentamiento Global a 20, 100 y 500 años.[3]

Tabla 1.- PCG en relación al CO_2 para algunos gases de efecto invernadero (CFC-12 y HCFC-21 son ejemplos de clorofluorocarbonos e hidroclorofluorocarbonos respectivamente).[3]

Gas		Vida Media (años)	Potencial de Calentamiento Global (horizonte temporal)		
			20 años	100 años	500 años
Dióxido de carbono	CO_2		*1*	*1*	*1*
Metano	CH_4	*12*	*62*	*23*	*7*
Óxido nitroso	N_2O	*114*	*275*	*296*	*156*
CFC-12	CCl_2F_2	*100*	*10,200*	*10,600*	*5,200*
HCFC-21	$CHCl_2F$	*2*	*700*	*210*	*65*

El PCG representa la medida cuantitativa del impacto relativo del *forzamiento radiativo*[I] de un gas en particular. El efecto directo se presenta cuando el gas a considerar es de efecto invernadero directo, mientras que el forzamiento indirecto se presenta cuando las transformaciones químicas en un gas producen uno o más gases de efecto invernadero directo, o cuando el gas afecta el tiempo de residencia de otros gases en la atmósfera.

El potencial de calentamiento global se mide en teragramos de equivalencia al CO_2, y esto se calcula con:

$$TgCO_2eq = \frac{Gg\ de\ gas * PCG}{1000} \cdots\cdots\cdots (1)$$

Donde
$T_gCO_2$eq, se refiere a los teragramos de equivalentes de CO_2
G_g se refiere a los giga-gramos (mil toneladas métricas) del gas a estudiar
PCG, son las siglas de Potencial de Calentamiento Global del gas a estudiar
1/1000 es el factor de conversión de giga gramos a teragramos

2.4. ¿Cuáles son los gases de efecto invernadero?

De acuerdo con el protocolo de Kioto de la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC por sus siglas en inglés)[11], Y como se mencionó anteriormente, los principales gases de efecto invernadero son 6: el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF_6) A continuación se describen estos gases:

- **Metano (CH_4):** Es un gas hidrocarburo, es el primer miembro de la serie de los alcanos. Es más ligero que el aire, es incoloro, inodoro e inflamable. Forma parte del gas natural que se extrae junto con petróleo, también se encuentra en el gas grisú de las minas de carbón y es producto de la descomposición de la materia orgánica.

[I] Cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la tierra (expresado en Watts por metro cuadrado, Wm^{-2}), debido a una alteración en la concentración de determinado gas o a cambios en la energía solar que incide en el planeta.[3]

En cuanto a su composición química, cuatro átomos de hidrógeno están unidos a uno de carbono por un enlace covalente. Su disposición atómica es tetraédrica, donde cada núcleo de H debe ubicarse en cada vértice. Su peso atómico es de 16.04 g/mol. Debido a que la molécula de metano es simétrica las polaridades individuales de los enlaces carbono hidrógeno se anulan, resultando en que la molécula no sea polar en sí.

El punto de fusión del metano ocurre a –182.5 °C y la ebullición a –161.5 °C. Debido a esto el metano se encuentra normalmente en estado gaseoso. Es poco soluble en agua, pero muy soluble en líquidos orgánicos, como la gasolina, éter y alcohol. Su densidad relativa es de 0.6 aproximadamente y la temperatura de auto ignición es 537 °C.

El origen del metano se encuentra principalmente en la descomposición de residuos orgánicos (28%), las fuentes naturales como los pantanos forman aproximadamente el 23% del metano, los combustibles fósiles constituyen cerca del 20%. Mientras que los procesos de digestión y defecación, principalmente del ganado forman el 17%, por último las bacterias en plantaciones de arroz forman aproximadamente 12% del total de metano generado.[12]

Después del CO_2, el metano es el gas de efecto invernadero que más contribuye al efecto invernadero. Tiene una vida atmosférica de aproximadamente 12 años, y es 23 veces más potente para retener calor en la atmósfera que el CO_2.

La concentración atmosférica de este gas se determina por el equilibrio entre el índice de ingreso y el índice de eliminación. Los índices de eliminación se determinan mediante la eficacia de los sistemas que absorben o neutralizan a dicho gas, los principales sistemas son la oxidación por reacción química con bases, la oxidación estratosférica y absorción microbiana mediante árboles y suelos. El metano constituye aproximadamente el 16% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.[13]

En cuanto a la salud, se trata de una sustancia que se puede absorber por inhalación, lo que puede originar asfixia por la disminución del contenido de oxígeno en el aire, resultando en la pérdida del conocimiento e incluso a la muerte. Los efectos de una exposición cutánea de corta duración, el contacto con el líquido o gas comprimido, puede causar efectos de congelación grave.[14]

- **Óxido Nitroso (N_2O):** Es un gas volátil, incoloro, con un olor dulce y ligeramente tóxico, provoca alucinaciones y estado eufórico en las personas. Químicamente es un gas estable y no reacciona con otros elementos o compuestos. Su masa molecular es de 44.013 g/mol, su temperatura de ebullición es de –89.5 °C, sus propiedades críticas 36.4 °C y 71.64 atm. A diferencia del metano, el N_2O requiere suficientes niveles de oxígeno para producirse.

  Es un gas de efecto invernadero que tiene una vida media de 100 años en la atmósfera, este gas también ataca a la capa de ozono reduciéndola a oxígeno molecular y liberando 2 moléculas de monóxido de nitrógeno (NO).[15]

  Se libera de forma natural de los océanos y de las selvas tropicales gracias a las bacterias del suelo. Algunas fuentes de origen antropogénico son los abonos a base de nitrógeno, la quema de combustibles fósiles y la producción química industrial que utiliza nitrógeno, como el tratamiento de residuos. Este gas de efecto invernadero es 296 veces más potente que el CO_2 para retener calor.[16]

La administración de N_2O al 100% puede producir asfixia y consecuentemente la muerte. Su mecanismo de acción consiste en llegar al cerebro a través de las vías respiratorias y disminuir la actividad normal de las neuronas. Dependiendo de su concentración y exposición, puede generar analgesia, excitación, anestesia quirúrgica (que se manifiesta por pérdida de conciencia y amnesia) o depresión total del sistema respiratorio (que sin apoyo artificial, provoca un estado de coma y muerte).[15]

- **Dióxido de carbono (CO_2):** Es el gas de efecto invernadero con mayor contribución al calentamiento global debido a la gran cantidad de emisiones producidas que se encuentra en la atmósfera, tanto por procesos naturales como antropogénicos. Es responsable de un poco más del 60% del efecto invernadero, aunque en algunos países representa más del 80% de las emisiones de GEI.

  En la Tierra existe una cantidad limitada de carbono, que forma parte del ciclo del carbono. Se trata de un sistema en el que el carbono se desplaza por la atmósfera, la biósfera terrestre y los océanos. Las plantas absorben el CO_2 de la atmósfera durante la fotosíntesis, utilizan el carbono y lo vuelven a liberar cuando mueren y se descomponen. Además, los cuerpos animales también contienen carbono el cual se libera como CO_2 cuando respiran y se descomponen, al morir. El CO_2 puede permanecer en la atmósfera entre 50 y 200 años, en función de cómo se recicle en la tierra o en los océanos.[16]

  El CO_2 es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante, por lo que también se puede disolver en el agua del océano. Tiene una masa molecular de 44 g/mol, su punto de ebullición es a –79 °C y su densidad relativa es de 1.5 g/ml. A condiciones estándar de presión y temperatura se encuentra en estado gaseoso, puede solidificarse si se somete a temperaturas inferiores de –79 °C y licuarse cuando se disuelve en agua. Al calentar el CO_2 a una temperatura por encima de 2,000 °C, se producen gases tóxicos de CO, el cual reacciona de manera violenta con metales. Por ejemplo, el Magnesio, Zirconio, Titanio, Cromo o Manganeso pueden generar una reacción exotérmica, incluso explosiva cuando se calientan en presencia de CO_2.[17]

  El dióxido de carbono se encuentra distribuido en la atmósfera de manera uniforme con una concentración de aproximadamente 403.96 ppm (medición realizada en octubre de 2017). Debido al aumento en el uso de combustibles fósiles, y entre otras causas la concentración de CO_2 en la atmósfera se ha incrementado durante el último siglo, incrementando en promedio 1 ppm cada año.[18]

  A temperatura ambiente la solubilidad del dióxido de carbono es de aproximadamente 90 cm^3 por 100 ml de agua. En solución acuosa, el CO_2 puede existir en diferentes formas, por ejemplo si simplemente se disuelve:

$$CO_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (aq) \cdots\cdots\cdots (2)$$

  Cuando se establece un equilibrio del CO_2 disuelto, obtenemos ácido carbónico.

$$CO_2(g) + H_2O\ (l) \rightarrow H_2CO_3\ (aq) \cdots\cdots\cdots (3)$$

Aproximadamente el 1% del CO_2 disuelto existe como H_2CO_3. El ácido carbónico es un ácido débil que se puede disociar en 2 pasos:

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad K_{a1^I} = 4.2 \times 10^{-7} \cdots\cdots\cdots (4)$$

$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-} \quad K_{a2} = 4.8 \times 10^{-11} \cdots\cdots\cdots (5)$$[19]

Como se mencionó anteriormente, el sector energético junto con el sector transporte son los principales responsables de las emisiones de este gas, debido a la quema de combustibles fósiles. Adicionalmente, la industria del cemento y las plantas de incineración de residuos contribuyen en buena medida. Mientras que las fuentes con menor aporte son la industria química y la metalúrgica.

En cuanto a los riesgos a la salud, si se inhala a concentraciones elevadas puede originar hiperventilación, pérdida del conocimiento, taquicardia y dolores de cabeza. Si la exposición al CO_2 es prolongada o repetitiva puede provocar alteraciones en el metabolismo de la persona.[17]

- **Perfluorocarbonos (PFCs):** Son compuestos sintéticos, es decir no hay fuentes naturales de emisión, son sustancias de síntesis industrial. Contienen átomos de flúor y de carbono. Generalmente, son gases incoloros e inodoros, no inflamables a temperatura ambiente y la mayoría no son reactivos con ningún elemento o compuesto químico.

  La mayor fuente de emisión de este tipo de gases se origina durante la producción primaria de aluminio y la incineración de plásticos y cerámicos. Este tipo de gases tienen aplicación en equipos de refrigeración, el sector electrónico y en los sistemas de extinción de incendios. Al llenar los pulmones con este líquido existe un intercambio de gases que normalmente se da al respirar, aunque genera daños al pulmón debido a que los PFCs son mucho más densos y viscosos, lo que provoca un descenso en los índices de respiración, y por lo tanto el intercambio de gases es más limitado.[20]

  Los PFCs son alcanos, químicamente inertes, contienen sobre todo átomos de carbono y flúor, y son hidrofóbicos. Estos gases tienen fuerzas intermoleculares débiles, por lo que son altamente solubles con otros gases.[21]

  Los más conocidos son el tetra-fluoruro de metano (CF_4 - Freón 14) y el hexa-fluoruro de etano (C_2F_6 – Freón 116). En general, los PFCs tienen la vida media más larga en la atmósfera respecto a los otros GEI; como ejemplo, el CF4 puede llegar a tener una vida de hasta 50,000 años y el C_2F_6 de hasta 10,000 años. A pesar de que los PFCs son los gases menos liberados a la atmósfera, tienen un impacto bastante importante como gases de efecto invernadero, ya que estos pueden ser desde 5,700 hasta 11,900 veces más potentes reteniendo calor que el CO_2.[22]

- **Hidrofluorocarbonos (HFCs):** Son un grupo de sustancias que contienen átomos de carbono, flúor e hidrógeno. Generalmente, son gases incoloros e inodoros a temperatura ambiente y la mayoría presentan una gran estabilidad química, no reaccionan con otros elementos o compuestos.

[I] K_{a1} y K_{a2} se refieren al valor de las constantes de equilibrio.

Al igual que los perfluorocarbonos, la emisión de estos gases proviene de actividades industriales (antropogénicas), por lo que no existen fuentes naturales de emisión. Este tipo de gases al igual que los PFCs se utilizan en equipos de refrigeración, como agentes propulsores en aerosoles y como material aislante en espumas para hogares y edificios. La exposición continua a algunos HFCs puede causar efectos adversos en órganos vitales como el cerebro y el corazón, no obstante los síntomas dependen del tipo de compuesto al que se esté expuesto.[23]

Los HFCs reemplazaron a los clorofluorocarbonos (CFC) y a los hidroclorofluorocarbonos (HClFCs), una vez que la comercialización de estos 2 fue limitada, inclusive en algunos países su uso fue prohibido cuando entró en vigor el Protocolo de Montreal el 1 de enero de 1989,[24] debido a las contribuciones de Mario Molina, Paul J. Crutzen y F. Sherwood, en el estudio de la liberación de estos gases a la atmósfera, los cuales son causantes de una serie de reacciones que destruyen la capa de ozono.[25]

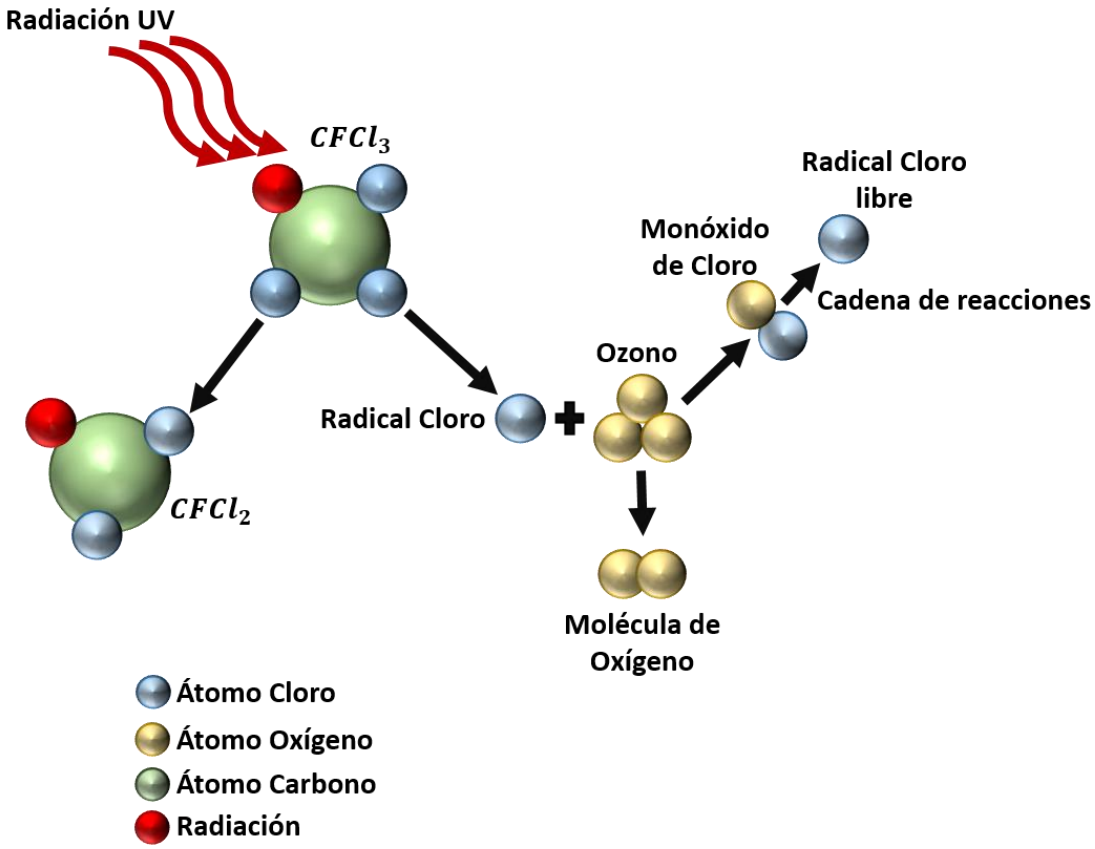


Figura 6.- Al momento en que la radiación UV quita la molécula de cloro ya sea de los CFCs o de los HCFCs, el átomo de cloro (Cl) se combina con una molécula de ozono (O_3) lo cual provoca que el ozono se convierta en oxígeno, liberándose después para volver a combinarse con otras moléculas de ozono y así sucesivamente, teniendo en promedio un átomo de cloro la capacidad de destruir hasta 100,000 moléculas de ozono. El proceso se detiene cuando el átomo de cloro se mezcla con algún compuesto químico que lo neutraliza.[25]

A pesar de que los HFCs se liberan a la atmósfera en cantidades mucho menores que el CO_2 o el metano, este tipo de gases tienen un aporte mucho mayor al efecto invernadero ya que tienen una vida promedio en la atmósfera de hasta 260 años, si bien la familia de HFCs es muy amplia y algunos tipos sólo tienen una vida media de 2.6 años, la mayoría tiende a permanecer por largos periodos en la atmósfera. Aunado a esto su potencial de calentamiento global en un horizonte de 100 años puede ser muy grande, hasta 12,000 veces más eficaces que el CO_2 para

retener calor, y por lo tanto contribuir con el calentamiento global en mayor medida con cantidades significativamente menores que otros gases de efecto invernadero.[22]

- **Hexafluoruro de azufre (SF_6):** Es un gas inerte, más pesado que el aire, no es tóxico ni inflamable, pero es asfixiante y tiene color y olor característicos. Se produce por reacción directa a unos 300 °C, a partir de azufre fundido y flúor gaseoso. Es estable a condiciones normales y al ser expuesto a temperaturas elevadas se descompone en productos tóxicos que pueden ser corrosivos en presencia de humedad.

  Su peso molecular es de 146.05 g/mol, su temperatura de sublimación es de –63.9 °C, la temperatura crítica es de 44.5 °C, la presión critica es de 37.1 atm y su densidad en estado gaseoso a condiciones estándar (20 °C y 1 atm) es de 6.16 g/L.

  La principal fuente de generación de estos gases son los equipos de distribución de energía eléctrica, ya que actúa como un gas aislante. Como resultado de procesos industriales, las principales fuentes son: la desgasificación del aluminio, procesos siderúrgicos de fusión de Magnesio y sus aleaciones, así como procesos de plasma en la industria electrónica para la fabricación de semiconductores.[26]

  La industria eléctrica utiliza el 80% de la producción mundial de SF_6 para la fabricación, puesta en marcha y operación de equipos de potencia como interruptores de corriente, líneas de transmisión, transformadores y subestaciones encapsuladas. Es un compuesto sintético, químicamente muy estable de alta densidad y no es biodegradable. Es químicamente compatible con la mayoría de los materiales aislantes y conductores usados en equipos eléctricos.[27]

  Como gas de efecto invernadero es el más potente de todos, ya que su vida media en la atmósfera al no ser biodegradable y ser un gas tan estable llega a ser hasta de 3,200 años, además de que su efectividad para retener calor es hasta 22,200 veces más potente que la del CO_2. Al igual que los HFCs este gas que se produce en cantidades pequeñas tiene un gran impacto como gas de efecto invernadero.[22]

La siguiente tabla muestra los valores del tiempo de vida en años que tienen los gases de efecto invernadero, además de algunos ejemplos de gases hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y algunos clorofluorocarbonos, que si bien no se toman en cuenta como gases de efecto invernadero, son causantes de la destrucción de la capa de ozono. También se encuentra el potencial de calentamiento global de cada uno de estos gases para horizontes de 20, 100 y 500 años, es decir la capacidad que tienen estos gases para retener **calor** en relación con el CO_2.

Tabla 2.- PCG en relación al CO_2 para algunos gases de efecto invernadero y algunos clorofluorocarbonos.[22]

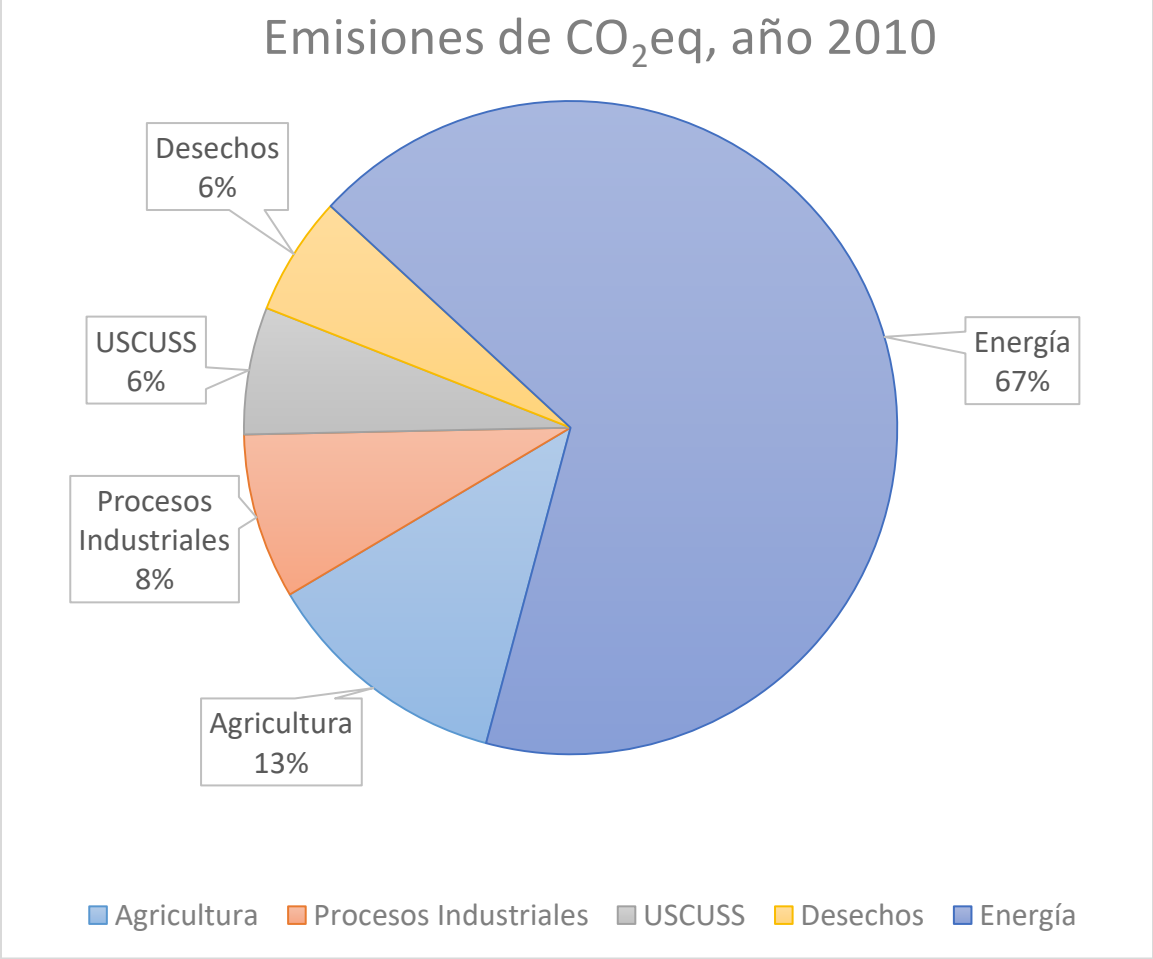
Gas		Tiempo de Vida (Años)	Potencial de Calentamiento Global (Horizonte Temporal)		
			20 años	100 años	500 años
Dióxido de Carbono	CO_2	-	*1*	*1*	*1*
Metano	CH_4	*12*	*62*	*23*	*7*
Óxido Nitroso	N_2O	*114*	*275*	*296*	*156*
Hexafluoruro de Azufre	SF_6	*3,200*	*15,100*	*22,200*	*32,400*
Hidrofluorocarbonos					
HFC-23	CHF_3	*260*	*9,400*	*12,000*	*10,000*
HFC-32	CH_2F_2	*5*	*1,800*	*550*	*170*
HFC-125	CHF_2CF_3	*29*	*5,900*	*3,400*	*1,100*
HFC-134	CHF_2CHF_2	*9.6*	*3,200*	*1,100*	*330*
HFC-143	CHF_2CH_2F	*3.4*	*1,100*	*330*	*100*
HFC-161	CH_3CH_2F	*0.3*	*40*	*12*	*4*
HFC-236fa	$CF_3CH_2CF_3$	*220*	*7,500*	*9,400*	*7,100*
Perfluorocarbonos					
Freón-14	CF_4	*50,000*	*3,900*	*5,700*	*8,900*
Freón-116	C_2F_6	*10,000*	*8,000*	*11,900*	*18,000*
Perfluorobutano	C_4F_{10}	*2,600*	*5,900*	*8,600*	*12,400*
Clorofluorocarbonos					
CFC-11	CCl_3F	*45*	*6,300*	*4,600*	*1,600*
CFC-12	CCl_2F_2	*100*	*10,200*	*10,600*	*5,200*
CFC-13	$CClF_3$	*640*	*10,000*	*14,000*	*16,300*
CFC-114	$CClF_2CClF_2$	*300*	*6,100*	*6,000*	*2,700*
CFC-115	CF_3CClF_2	*1,700*	*7,500*	*9,800*	*8,700*

2.5. Generación de gases de efecto invernadero provenientes de actividades humanas en México

Las emisiones de GEI en unidades de dióxido de carbono equivalentes (CO_2eq) sumaron un total de 748 millones de toneladas en México durante el año 2010. Si comparamos este valor con las emisiones en el año 1990 se puede observar un incremento de aproximadamente del 33%, teniendo una tasa de crecimiento media anual de estos gases del 1.5%.[28]

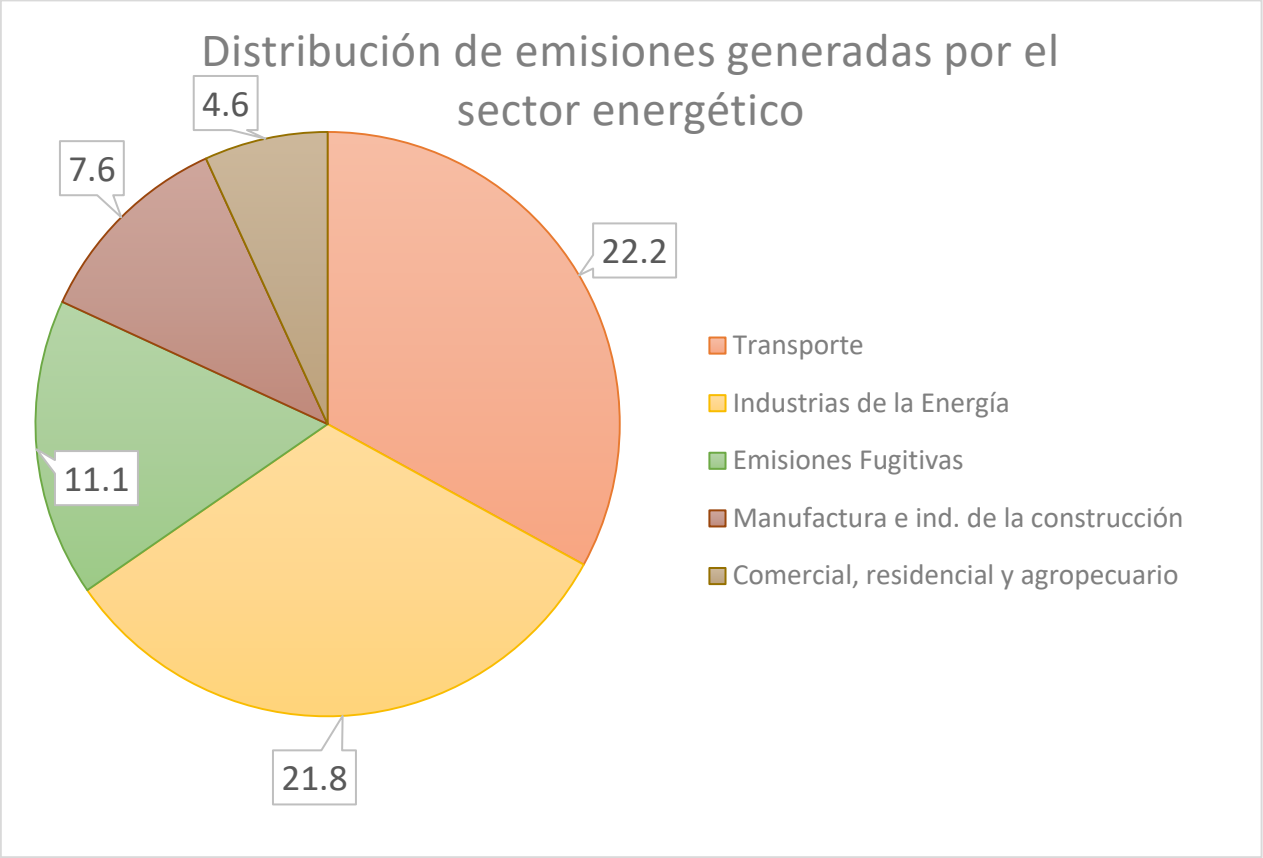
Las emisiones de GEI en el año 2010 en México, en términos de CO_2 eq se pueden distribuir de la siguiente manera:

- Generación de energía 67.3%, siendo equivalente a 503,817.6 Gg.
- Agricultura el 12.3% (92,184.4 Gg).
- Procesos industriales tienen una contribución del 8.2% (61,226.9 Gg).
- El uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura el 6.3% (46,892.4 Gg).
- Por último, debido a los desechos es el 5.9% (44,130.8 Gg)



Gráfica 1.- Contribución de emisiones de GEI por categoría, 2010.[28]

Es posible desglosar el porcentaje correspondiente a energía en industrias con un aporte del 21.8%, manufactura e industria de la construcción con 7.6%, trasporte aporta el 22.2%, el sector comercial, residencial y agropecuario representan un 4.6% y finalmente, las emisiones fugitivas que representan un 11.1%, sumando estos valores 100% de la parte generada por el sector energético.



Gráfica 2.- Contribución de emisiones de GEI generados en el sector energético, 2010.[28]

De acuerdo con los datos anteriores se observa que la generación de energía representa más de la mitad de las emisiones de CO_2eq, siendo la industria de la energía[l] la segunda fuente de mayor aporte. Para efectos de este trabajo nos centraremos en este sector, sin embargo, se dará un breve panorama de las demás fuentes de generación de GEI en México.

2.5.1. Por procesos industriales

Las emisiones de GEI derivadas de los procesos industriales en México, durante el periodo de 1990 a 2010 se incrementaron en un 102.3%, pasando de 30,265.6 Gg a 61,226.9 Gg de CO_2eq. El aumento en las emisiones se debe principalmente al incremento del uso de piedra caliza y dolomita como materias primas en la producción de cal viva, cal hidratada y cemento, al aumento en la producción de cemento y un aumento significativo en el consumo de gases fluorados (HFC y SF_6).

Por otro lado, la industria química ha disminuido notablemente sus emisiones durante este mismo periodo, en un 66.2%, pasando de 4,579.8 Gg a 1,548.9 Gg de CO_2eq, esto debido a la reducción en la producción de petroquímicos básicos y secundarios.

En 2010 la lista de fuentes de mayor contribución de emisiones de CO_2 fueron; la producción de cemento en 47.5% representando 20,003.3 Gg, el uso de piedra caliza y dolomita 29.6% (12,445.7 Gg), la producción de hierro y acero 12.1% (5,111.0 Gg), la producción de cal 6.3% (2,664.3 Gg), producción de amoniaco 3.2% (1,348.5 Gg), producción de ferroaleaciones 0.9% (358.2 Gg), producción de carbonato de sodio 0.3% (120.4 Gg) y la producción de aluminio en 0.1% (30 Gg).[28]

[l] Entiéndase por industria energética, aquellas industrias que se dedican a su generación sin importar la fuente que utilicen (combustibles fósiles, bio-combustibles, fuentes geotérmicas, etc.), comprendiendo la producción, el transporte, en algunos casos la refinación, distribución y almacenamiento. Para el caso del gas se toma en cuenta el venteo y su quema.

2.5.2. Agricultura

Durante el periodo de 1990 a 2010, las emisiones totales anuales registraron un promedio de 89,129.01 Gg de CO_2eq, siendo el valor máximo de 92,785.9 Gg de CO_2eq en 1990 y el valor mínimo de 86,161 Gg en 1999. Las emisiones registradas en 2010 fueron de 92,184.6 Gg de CO_2eq.

La variación entre la cantidad de emisiones durante este periodo se debe al continuo cambio en el número de cabezas de ganado. Mientras que el ganado vacuno disminuyó un 5.57%, las aves aumentaron en 162.52%. También se deben considerar las variaciones de cabezas equinas con una reducción de 63.99%, reducción en cabezas de mulas y asnos en 78.04% y también una reducción en cabezas de cabras en 13.85%. Por otro lado un aumento del ganado lechero en 59.71%, el incremento de ovinos en 38.65% y por último el incremento de porcinos en 1.53%.[28]

2.5.3. Uso del suelo, cambio del suelo y silvicultura

Las emisiones totales promedio anuales durante el periodo de 1990 a 2010 fueron de 73,872 Gg de CO_2, siendo el valor máximo de 122,372 Gg de CO_2 en 1991 y el valor mínimo de 45,369 Gg de CO_2 en 2002. Durante este mismo periodo se apreció una disminución de 55% en las emisiones, pasando de 101,257 a 45,670 Gg de CO_2.

Los cambios de biomasa en bosques y otras reservas tuvieron una disminución, lo que representó una reducción de 64% en sus emisiones pasando de 16,159 Gg de CO_2 en 1990 a 5,861 Gg de CO_2 en 2010[l]. La conversión de bosques y otras coberturas vegetales a usos como el agrícola se vio reducida en este periodo, dando como resultado una disminución de 39% en sus emisiones, de 73,720 Gg de CO_2 a 45,325 Gg de CO_2 de 1990 a 2010. Esto se debe a una reducción de la superficie de conversión.

Las emisiones derivadas de los suelos minerales tienen una tendencia a la baja. En 1993 de mostraron las mayores emisiones (29,915 Gg de CO_2), mientras que las menores se registraron en 2002 (11,165 Gg de CO_2) y en 2010 (12,593 Gg de CO_2).

Otro factor influyente es el abandono de tierras cultivadas, donde se presenta revegetación que a su vez da lugar a una reducción de emisiones, pasando de 8,070 Gg de CO_2 a 15,256 Gg de CO_2 no emitidos a la atmósfera, de 1990 a 2010, representando así una disminución de 124% en las emisiones de CO_2 y por lo tanto contribuyendo de manera positiva en la reducción de las mismas.[28]

2.5.4. Desechos

Las emisiones de CO_2eq en cuanto a los desechos aumentaron en 167%, pasando de 16,529.1 Gg en 1990 a 44,130.8 Gg en 2010. Este aumento es una consecuencia principalmente del crecimiento de la población, de la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios tecnificados y del impulso dado al tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Las emisiones de CH_4 del periodo 1990 a 2010 tuvieron un crecimiento de 178%, pasando de 707.9 Gg a 1,967.8 Gg.

En cuanto a los desechos sólidos el incremento fue de 232.4%, pasando de 316.8 Gg a 1,053.2 Gg en el periodo de 1990 a 2010. El incremento para aguas residuales municipales fue de 126.6%, pasando de 188 Gg a 426 Gg durante el mismo periodo (1990 a 2010). Para aguas residuales industriales hubo un incremento de 149.7%, pasando de 181.3 a 452.7 Gg. En términos de la contribución de emisiones de CH_4, los desechos sólidos pasaron de 44.8% a 53.5% y las aguas residuales pasaron de 52.2% a

[l] No se toman en cuenta aprovechamientos no autorizados (tala ilegal) por falta de información oficial.

44.7% del total. Las subcategorías restantes, tanto tratamiento biológico de desechos sólidos como incineración e incineración a cielo abierto, disminuyeron su participación de 3% a 1.8% en este periodo de 1990 a 2010.[28]

2.5.5. Generación de Energía

Esta categoría está comprendida por las emisiones de CO_2 derivadas del consumo de combustibles fósiles y emisiones fugitivas que liberan metano.

Durante el uso de combustibles fósiles, las emisiones de CO_2 dependen del contenido de carbono en el combustible, sin embargo, partes del carbono se liberan en forma de monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) o compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM). Para la contabilidad y análisis de gases de efecto invernadero sólo se consideran los de efecto directo (CO_2, CH_4 y N_2O).

El consumo nacional de combustibles fósiles y biomasa se define como la suma del consumo de los sectores de industrias energéticas, transporte, industria (manufactura, minería y construcción), comercial, residencial y agropecuario[l].

Las emisiones de GEI expresadas en CO_2 eq el sector energético registraron un aumento de 56.5% durante el periodo 1990 a 2010, pasando de 319,173.8 Gg a 503,817.6 Gg, lo que representa una tasa de crecimiento media anual de 2.3%.

El consumo de combustibles fósiles en la generación de GEI en 2010 tuvo una contribución de 83.5% (420,697.9 Gg de CO_2eq) en comparativa con su contribución de 85.4% (272,570.3 Gg de CO_2eq) en 1990, teniendo las emisiones fugitivas una participación de 16.5% y 14.6% en 2010 y 1990 respectivamente en la generación de GEI. Las emisiones fugitivas de metano tuvieron un incremento de 78.4% durante el periodo 1990 – 2010 pasando de 46,603.5 Gg de CO_2eq a 83,119.8 Gg de CO_2eq.

En 2010 las emisiones de GEI en unidades de CO_2 eq se dividen en los siguientes sectores:

- Trasporte con el 33%, representando 166,412 Gg de CO_2eq.
- Industria de la energía el 32.3% con 162,969.2 Gg de CO_2eq.
- Manufactura e industria de la construcción el 11.3% con 56,740.8 Gg de CO_2eq.
- Emisiones fugitivas 16.5% con 83,119.8 Gg de CO_2eq.
- Sector comercial, residencial y agropecuario el 6.9% con 34,575.8 Gg de CO_2eq.

Para el año 2010 la principal fuente de emisión fue el CO_2, representando el 80.4% (405,130.2 Gg), seguida por las emisiones de CH_4 con 16.9% (84,966 Gg de CO_2eq) y N_2O con 2.7% (13,721.4 Gg de CO_2eq).

En cuanto a las emisiones de CO_2 por tipo de combustible, es decir el 80.4% del total de emisiones del sector energía durante el año 2010, el consumo de gasolina y de gas natural representan la mayor contribución de emisiones, representando el 25.4% (102,755 Gg) y 31% (125,586 Gg) respectivamente, siguiendo el diésel que aporta 14.7% (59,382 Gg), el combustóleo con 9.8% (39,639 Gg) y el 19.1% (77,768.2 Gg) restante corresponde al carbón, coque de petróleo, gas licuado de petróleo y querosenos.

[l] No se considera el consumo eléctrico en cada sector ya que las emisiones se contabilizan en la generación.

Durante el periodo 1990 a 2010 las emisiones de CO_2 a partir del uso del gas natural se incrementaron 141.5%, relacionadas al consumo del carbón hubo un incremento de 324.4%, las emisiones debidas al coque de petróleo crecieron 231% en el periodo registrado de 2000 a 2010, mientras que las emisiones debido al uso de combustóleo se redujeron 52.8% al igual que las emisiones debido al uso de querosenos en 25.3%.

A continuación, se muestra una tabla comparando las emisiones por tipo de combustible utilizado en 1990 y 2010, además de su incremento o decremento porcentual en cuanto a la generación de CO_2 eq.

Tabla 3.- Comparación de las emisiones por uso de combustibles en 1990 y 2010.[28]

Combustible	1990	2010	Cambio en el periodo (%)
	Gg de CO_2		
Carbón	*7,050*	*29,921.5*	*324.4*
Coque Carbón*	*1,154.4*	*3,165*	*174.2*
Coque Petróleo	*34.9***	*11,524.8*	*231*
Gas LP	*20,638.3*	*28,317*	*37.2*
Gasolinas	*62,460.4*	*102,754.8*	*64.5*
Querosenos	*6,504.7*	*4,857.6*	*-25.3*
Diesel	*35,623.5*	*59,381.9*	*66.7*
Combustóleo	*84,019.8*	*39,639.2*	*-52.8*
Gas Natural	*52,004.2*	*125,568.3*	*141.5*

** Se sustrajo el consumo de coque de carbón que se utiliza en la industria siderúrgica como materia prima (INEGI, varios años).*
*** Cifras del año 2,000.*

Por su parte, el consumo nacional de combustibles para el sector energía creció 51.2% durante el periodo 1990-2010, pasando de 4,242.9 a 6,415.9 PJ (Peta Joule). En el año 2010 el gas natural fue el combustible de mayor consumo representando el 34.9%, seguido por la gasolina con 23.2% y el diésel con el 12.6%. Esto se debe a que el uso de combustóleo se sustituyó por el uso de gas natural en la generación de energía eléctrica.

Para el consumo y generación de energía eléctrica se aumentó el uso de carbón y de gas natural, mientras que el uso de combustóleo disminuyó, en la manufactura e industria de la construcción hubo un aumento significativo en el consumo de coque de carbón y petróleo mientras que se redujo el consumo de gas natural. Respecto al transporte disminuyó ligeramente el uso de gasolinas, mientras que el uso de gas LP y diésel aumentó. En el sector comercial, residencial y agropecuario se incrementó ligeramente la proporción del uso de gas LP y diésel.

Respecto a las emisiones de CO_2, se incrementaron en 50.4% y las emisiones de CO_2 eq se incrementaron 54.6%. Desglosado, las emisiones de CH_4 aumentaron 20.7% sin considerar emisiones fugitivas, y las de N_2O se incrementaron en 765.6%.

A continuación se presenta una tabla que describe de manera detallada la contribución a las emisiones de GEI de cada sector dentro de la generación de energía, comparando los periodos de 1990 y 2010, expresado en Gg de CO_2eq.[28]

Tabla 4.- Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero en 1990 y 2010.[28]

Sector	CO_2		CH_4		N_2O		Total	
	1990	2010	1990	2010	1990	2010	1990	2010
	Gg de CO_2eq							
Consumo Propio (Sector Generación Eléctrica)	37,140	47,359	26.4	27.7	62.4	45.2	37,228.8	47,319.9
Generación eléctrica	66,719.2	114,873.4	32	136.3	105.4	527.7	66,856.6	115,537.4
Manufactura industria de la construcción	50,681.2	56,488.6	71.4	78.5	168.7	173.7	50,921.3	5,6740.8
Transporte	87,872.5	153,384.5	388.4	469.7	888.4	12,557.8	89,149.3	166,412
Comercial	3,718.7	4,809.7	5.2	13.8	6.8	19.1	3,730.6	4,842.6
Residencial	18,339.7	19,986.7	992.2	1,096.5	340.8	377	19,672.7	21,460.1
Agropecuario	4,984	8,228.3	14.4	23.8	12.7	21	5,011.1	8,273.1
Subtotal	269,455.3	405,130.2	1,529.8	1,846.2	1,585.3	13,721.5	272,570.3	420,697.9
1B Emisiones Fugitivas	(Gg de CO_2eq)							
Minas de Carbón	N.E.	N.E.	2,366.8	6,556.9	-	-	2,366.9	6,556.9
Petróleo y gas natural	N.E.	N.E.	44,236.7	76,562.9	-	-	44,236.7	76,562.9
Subtotal	-	-	46,603.5	83,119.8	-	-	46,603.5	83,119.8

La generación de electricidad representó un crecimiento de 72.8% durante el periodo de 1990 a 2010 en emisiones de GEI, pasando de 66,856.6 a 115,537.4 Gg de CO_2 eq. En este sector el consumo de combustibles para la generación de electricidad tuvo un aumento de 90% durante el mismo periodo.

Por otro lado, el consumo propio[l] del sector energético tuvo un aumento en el consumo de combustibles fósiles en 36.42% durante el periodo 1990 a 2010.

De acuerdo con información de CFE la capacidad instalada y la generación bruta (incluyendo a CFE y productores independientes) se incrementaron en 108% y 111% respectivamente, comparado con las cifras de SENER, donde se marca un aumento de 107.8% en la capacidad instalada y 112% en la generación bruta.

La generación de emisiones a partir del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad en 2010 se distribuye de la siguiente manera:

- Gas natural: 47,7% con 55,140.2 Gg.
- Combustóleo: 25% con 28,928.5 Gg.
- Carbón: 26.3% con 30,386.5 Gg.
- Diésel: .9% con 1,082.2 Gg.

[l] Refiriéndonos al consumo de energía que necesitan estas compañías para poder operar, no lo que producen.

En cuanto a las emisiones generadas a partir del consumo que requiere este sector para operar, durante el periodo 1990-2010, cambiaron de la siguiente manera:[28]

- CO_2 pasó de 37,140 a 47,359 Gg, representando un aumento de 27.5%.
- El CH_4 pasó de 26.4 a 27.7 Gg de CO_2 eq, con un aumento del 5%.
- El N_2O disminuyó de 62.4 a 45.2 Gg de CO_2 eq, representando un descenso de 27.5%.

Para la generación de energía en el mismo periodo las emisiones cambiaron de la siguiente manera:

- CO_2 pasó de 66,719 a 114,873.4 Gg, representando un aumento de 72.2%.
- El CH_4 pasó de 32 a 136 Gg de CO_2 eq, con un aumento de 326.1%.
- El N_2O aumentó de 105.4 a 527.7 Gg de CO_2 eq, representando un incremento de 400.5%.

La metodología para la estimación de emisiones de CO_2 en el sector energía se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$CO_2 = \sum_{j=1}^{n} \left(Combustible_j \times FE_j \times FO_j \times \frac{44}{12} \right) \cdots\cdots\cdots (6)$$

Donde:

CO_2: emisiones de dióxido de carbono en unidades de masa
j: tipo de combustible j
FE: factor de emisión del combustible j
FO: fracción oxidada del combustible j

Tabla 5.- Factores de oxidación para diferentes combustibles.[28]

Combustible	Fracción Oxidable
Carbón	0.980
Petróleo Crudo	0.990
Condensados	0.995
Gas Asociado	0.995
Coque Carbón	0.980
Coque Petróleo	0.990
GLP	0.990
Gasolinas	0.990
Querosinas	0.990
Diesel	0.990
Combustóleo	0.990
Gas Natural	0.990

Para las emisiones distintas al CO_2, es decir para las emisiones de CO, CH_4, N_2O, y COVDM[l] se calcularon con base en una combinación de factores de emisión sugeridos por el Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático, utilizando la siguiente ecuación:[28]

$$Gas_i = \sum_{j=1}^{n} (Combustible_j \times FE_{ij}) \cdots\cdots\cdots (7)$$

Donde:

j: Tipo de combustible
i: GEI diferente al CO_2
FE_{ij}: Factor de emisión del gas para el combustible j

Para las emisiones fugitivas de metano en cada proceso dentro de la industria del petróleo y del gas se presenta la siguiente tabla, con los valores expresados en Gg de CO_2 eq.

Tabla 6.- Emisiones fugitivas de metano (Gg de CO_2 eq).[28]

	PETRÓLEO				GAS NATURAL					
AÑO	Producción	Transporte	Refinación	Almacenamiento	Producción	Procesamiento, Transmisión y Distribución	Fugas Industriales	Fuga (Residencial y Comercial)	Venteo, Quema en antorcha	Total
1990	310.2	43.7	43	7.8	9,586.6	3,356.9	833	31	30,024.6	44,236.7
2010	334.4	49.6	43.5	7.9	17,054.1	4,628.5	996.6	36	53,412.5	76,562.9

2.6. Dióxido de carbono como gas de efecto invernadero y sus propiedades.

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, es un ion molecular y con el oxígeno forma el dióxido de carbono CO_2, gas resultante de procesos geoquímicos y biológicos, cuya presencia en la atmósfera es fundamental para la regulación de la temperatura en el planeta. El CO_2 se puede mezclar con el aire en una proporción casi uniforme, por lo que con la altura disminuye la cantidad de este gas. Con forme aumenta la altura a la que se encuentra el CO_2 su cantidad decae, pero no proporcionalmente, mientras que la temperatura en sí disminuye proporcionalmente con la altura, a aproximadamente 6.5 °C/km. Este gradiente térmico es igual en cualquier lugar geográfico.

La concentración atmosférica de CO_2 ha cambiado en diferentes épocas, incluso hay evidencia de concentraciones de CO_2 mayores a 3,000 ppm hace 400 y 600 millones atrás. El dióxido de carbono antes de la época industrial, por el año 1750, tuvo una concentración de aproximadamente 280 ppm, mantenida durante 10 mil años, sin embargo, para el año 1999 se había incrementado a 367 ppm, y para el año 2017 a 403.96 ppm, las concentraciones de CO_2 atmosférico no se han excedido durante los anteriores 420,000 años. La concentración de CO_2 en la atmósfera no representa las emisiones antropogénicas y naturales emitidas a la atmósfera, debido a que una parte de estas se disuelven en océanos y otra parte es tomada por algunos ecosistemas terrestres.[29]

[l] Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano.

El CO_2 antropogénico que se puede disolver en el océano depende de la circulación de éste y de la química del carbonato. Conforme la producción de CO_2 antropogénico se incrementa, la fracción que el océano disuelve disminuye y aumenta la concentración de CO_2 en el aire. Por lo tanto, la fracción de CO_2 atmosférico que absorbe el océano también disminuye debido a que la taza de mezclado entre aguas más profundas y la superficie limita el consumo de CO_2 por el océano. El incremento de CO_2 no tiene un efecto significativo en la productividad biológica marina, no obstante reduce el pH de los océanos, alterando significativamente a algunas especies, como los arrecifes.
Por otra parte, el consumo de CO_2 terrestre depende de la producción neta de biomas[l], así como de las pérdidas de carbono debido a la respiración, descomposición de organismos y el fuego, el efecto de fertilización (debido al CO_2) ocurre directamente a través de la fotosíntesis y a grandes concentraciones de CO_2 los efectos de fertilización tienden a ser pequeños. La efectividad de la tierra para consumir carbono depende en la transferencia de carbono a formas con largos tiempos de residencia como madera o materia orgánica del suelo.[30]

Debido al cambio climático, el ciclo del carbono también es modificado en los siguientes aspectos:

- El calentamiento reduce la solubilidad de CO_2 y por lo tanto se reduce la cantidad absorbida por el océano.

- A pequeñas escalas de tiempo, el calentamiento incrementa la tasa de absorción de la tierra, lo que puede alterar los flujos entre la atmósfera y la tierra. Cambios regionales en patrones de precipitación pueden ocasionar cambios en la estructura de ecosistemas terrestres, cambiando a su vez la distribución y la producción de biomas.

- La deforestación y la reforestación tienen efectos significativos en el ciclo del carbono terrestre, además de que algunos fenómenos como los incendios provocan un gran aumento de emisiones de CO_2 y a la vez se reduce la cantidad de vegetación que puede absorber el CO_2.

Las emisiones de CO_2 provenientes de la quema de combustibles fósiles son prácticamente el factor dominante en las concentraciones de CO_2 durante el siglo XXI, aunque debido al cambio de uso de suelo también existe incremento en la concentración de CO_2 en este periodo de tiempo. En otras palabras, la influencia humana en los flujos de carbono en los 3 grandes depósitos (atmósfera, océano y biosfera terrestre) representa una perturbación significativa en un gran ciclo global.

[l] También llamado paisaje bioclimático o áreas bióticas, son determinadas partes del planeta que comparten clima, flora y fauna. Es el conjunto de ecosistemas característicos de una zona biogeográfica y está definido por su vegetación y las especies animales que predominan.[44]

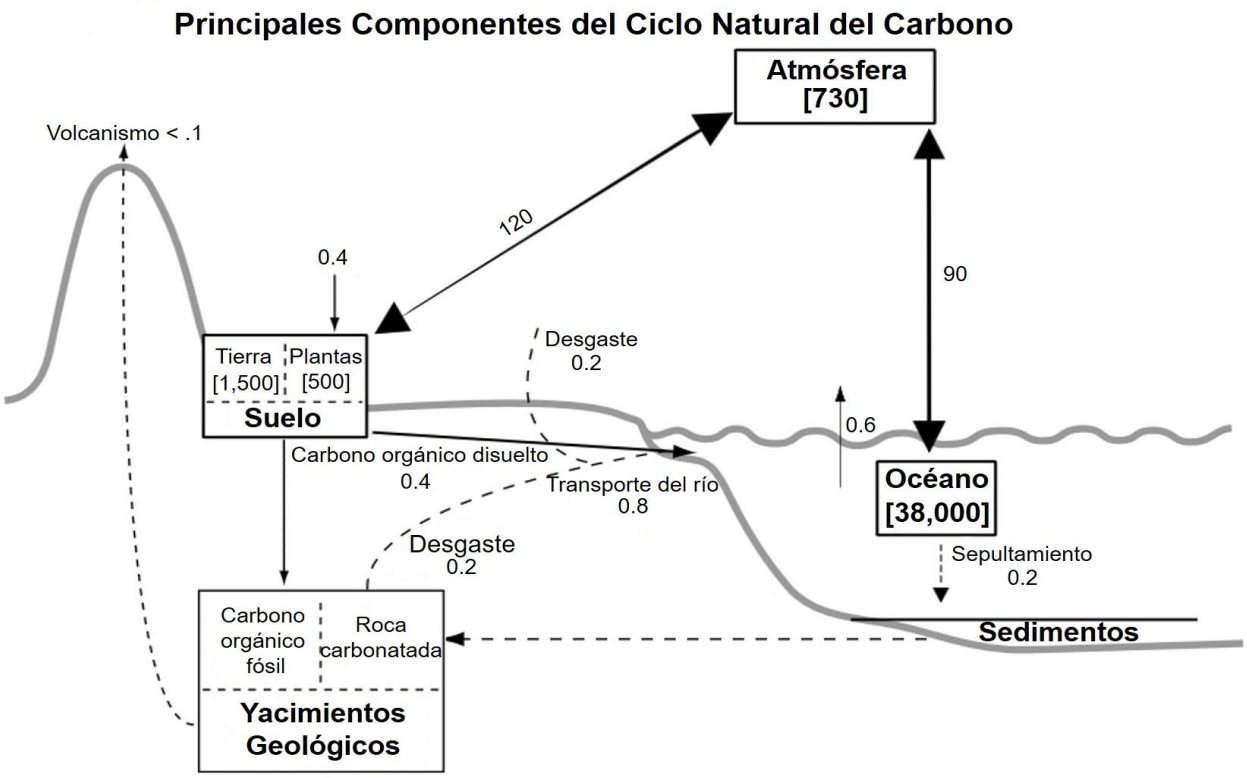


Figura 7.- Esquema de los principales componentes del ciclo natural del carbono. Los valores representan los peta gramos[I] de CO_2 producidos o tomados por diferentes partes del sistema al año (Pg/año).[30]

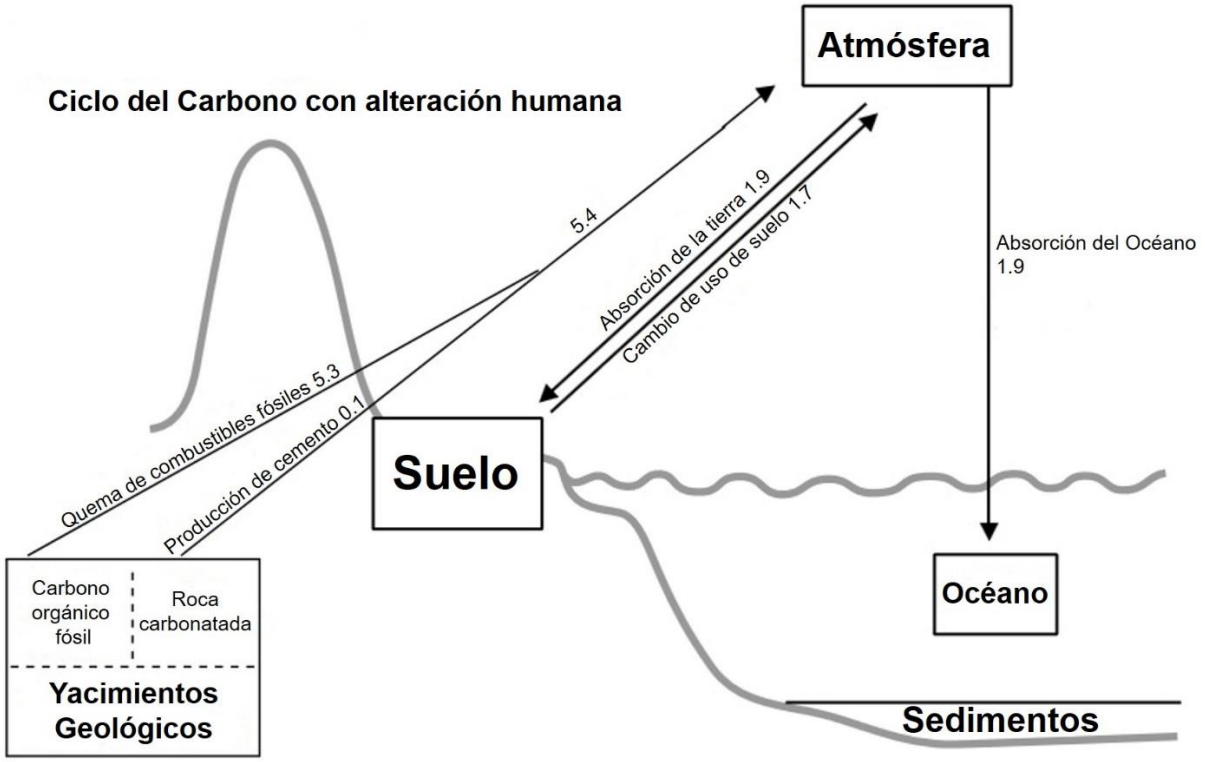


Figura 8.- Esquema de las perturbaciones causadas en el ciclo del carbono debido a actividades humanas. Los valores representan los peta gramos de CO_2 producidos o tomados por diferentes partes del sistema al año (Pg/año).[30]

[I] 1 Peta gramo es igual a 1 x 10^{15} gramos.

Un incremento en la concentración de CO_2 en la atmósfera tiene 2 efectos en la enzima RuBisCO[I], incrementa la taza de reacción con el CO_2 y disminuye la taza de oxigenación. Ambos efectos incrementan el ritmo de la fotosíntesis. Con una fotosíntesis incrementada, las plantas se desarrollan de manera más rápida alcanzando el mismo tamaño final en menos tiempo, e incluso pueden incrementar su masa final.

El proceso de fertilización del CO_2 involucra efectos directos en la asimilación del carbono y efectos indirectos como aquellos donde una gran concentración de CO_2 reduce la transpiración, incrementando la permanencia del agua dentro de las plantas, además de alteraciones en entre el ciclo del carbono y del nitrógeno. Debido a esto el incremento de CO_2 puede generar cambios en la estructura y la fisionomía de las plantas, pudiendo afectar los patrones de competencia y distribución de diferentes especies.[30]

Como se puede apreciar debido al gran incremento en las emisiones de CO_2 durante los últimos años, este gas no sólo funciona como un gas de efecto invernadero, sino también cambia las condiciones de algunos ecosistemas, sobre todo refiriéndonos a la vegetación ya que altera las tasas de crecimiento, altera la fotosíntesis e incluso la distribución de algunas especies vegetales. Un aumento en la concentración de CO_2 océano puede cambiar de manera directa condiciones biológicas, es capaz de alterar el pH y a futuro podría ocasionar distintos problemas.[30]

2.7. Mapa de la ruta tecnológica en México

Desde el año 2008, en México, se han intentado implementar tecnologías de uso, captura y almacenamiento de CO_2. La ley general de cambio climático elevó a ordenamiento de carácter legal medidas para combatir las causas del cambio climático. Debido a esto la SENER conformó y oficializó el Mapa de Ruta Tecnológica (MRT) de CCUS[II]. Para realizar esto, se conformó un equipo de trabajo encabezado por SENER (Secretaría de Energía) y SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), con la participación de PEMEX (Petróleos Mexicanos), CFE (Comisión Federal de Electricidad), UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), IPN (Instituto Politécnico Nacional) y el Centro Mario Molina (CMM).[1]

En México el sector energético es la fuente fija principal de emisiones de gases de efecto invernadero con un 21% respecto a los demás sectores. A continuación, se presenta una imagen que muestra los principales puntos de emisión fijos de CO_2 en México, así como un aproximado de las emisiones producidas anualmente en estos puntos.

[I] RuBisCO es una enzima involucrada en el proceso de conversión de carbón inorgánico en componentes orgánicos, proceso realizado por organismos vivientes. El ejemplo más claro de este proceso es la fotosíntesis.[45]
[II] CCUS, por sus siglas en inglés, carbon capture, use and storage, que significa captura, uso y almacenamiento de CO_2.

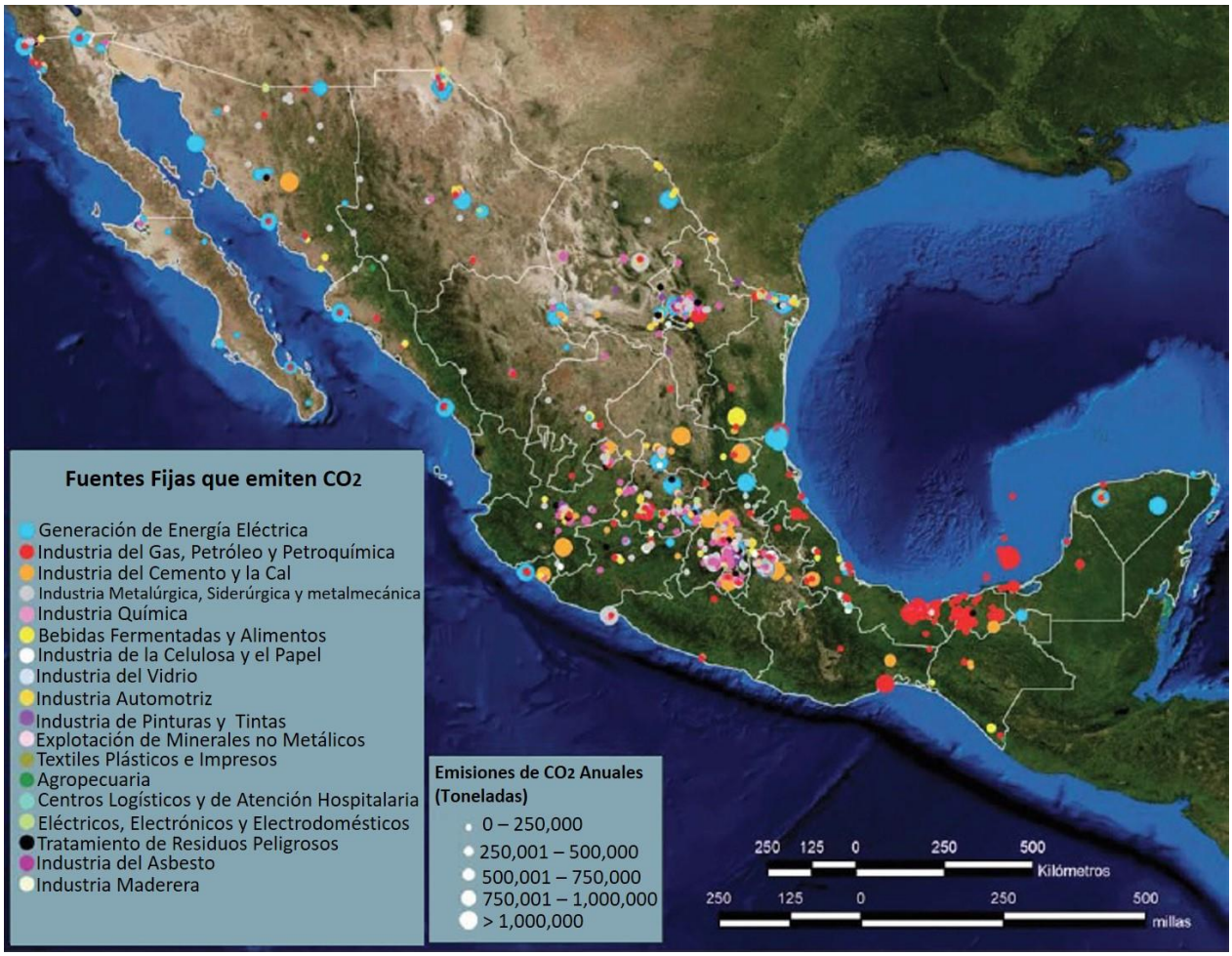


Figura 9.- Principales fuentes fijas emisoras de gases de efecto invernadero en México.[1]

Los objetivos de este mapa de la ruta tecnológica son:

- Diseñar la ruta crítica oficial de CCUS, desde su incubación hasta la implementación a escala comercial.

- Construir una base sistémica y ordenada que permita gestionar recursos etiquetados para asimilar la tecnología de CCUS en el país.

- Promover incentivos económicos y regulatorios para la implementación de la tecnología.

- Promover las transacciones de emisiones y mercados de carbonos en los que México pueda participar, así como facilitar el flujo de recursos y apoyos internacionales.

- Articular las actividades productivas y de investigación en temas regulatorios, de captura, de transporte, uso y almacenamiento de CO_2 con la intención de optimizar su desarrollo.[1]

Las etapas del MRT de manera resumida, son las siguientes:

I.- Incubación: Representa la etapa precursora de las acciones que en el futuro serán sistémicas ya que formarán parte de programas regulares de diferentes instituciones. A su vez está dividida en:

- **Convenio Marco**: Se establecen SENER Y SEMARNAT como instituciones reguladoras. Mientras que PEMEX y CFE como la industria implicada. Uno de los objetivos del convenio es lograr un proyecto integrado de CCUS aprovechando el CO_2 de una central termoeléctrica para la recuperación mejorada de hidrocarburos.

- **Análisis de mercados de carbono**: Consta de analizar el panorama a corto, mediano y largo plazo sobre las relaciones que imperarán en México y el mundo tanto de los precios de reducción de emisiones de CO_2 como de las penalizaciones por su emisión a la atmósfera.

- **Vinculación con organismos internacionales de ciencia y tecnología en CCUS**: En esta fase se pretende llevar a cabo vínculos con instituciones de ciencia y tecnología internacionales que dominen el tema, con intención de que a corto plazo técnicos mexicanos sean capaces de operar instalaciones de CCUS y monitorear los sitios para asegurar el almacenamiento a perpetuidad.

- **Mecanismos de financiamiento y fondeo nacionales e internacionales para la implementación de la tecnología**: Al ser el CCUS una tecnología demandante de recursos económicos elevados, se requiere vinculación de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) desde el inicio de su desarrollo. Debido a lo costoso de este tipo de proyectos se debe tener en cuenta la participación de centros de investigación, la industria y demás organismos financieros con un enfoque de sustentabilidad para continuar la marcha del desarrollo.

- **Análisis del marco regulatorio**: Almacenar permanentemente el CO_2 trae consigo responsabilidades que se deben limitar y deslindar. México aún no cuenta con adecuaciones y normatividad acerca del manejo de CO_2, sus formas de almacenamiento, así como las obligaciones y responsabilidades de la vigilancia del comportamiento una vez almacenado.[1]

II.- Política Pública: Una vez iniciada la etapa de incubación y el logro de sus primeros avances, se dará inicio a la conformación de las políticas públicas en materia del uso y secuestro del CO_2. Éstas tendrán el objetivo de garantizar el marco de seguridad del uso de la tecnología, la sustentabilidad de su desarrollo y la disponibilidad de recursos económicos que garanticen el cumplimiento de las metas que se establezcan. Y consta de las siguientes fases:

- **Construcción de capacidades**: Se requiere acelerar la difusión del conocimiento y capacidades de CCUS a través de programas universitarios regulares y posgrados. Se deberán adecuar programas de estudio de carreras profesionales de las disciplinas necesarias, desarrollar planes coordinados de becarios en el extranjero y cursos específicos impartidos por autoridades internacionales para el corto plazo y nacionales en el mediano y largo plazo.

- **Adecuaciones al marco regulatorio**: Al concluir el análisis del marco regulatorio en la etapa de incubación, se debe dar lugar a la adecuación y generación de las regulaciones necesarias, para que se desarrolle de manera correcta la tecnología de CCUS.

- **Observación de la obligatoriedad de monitoreo permanente**: En esta fase recae la seguridad del almacenamiento geológico. Las políticas deben ser oportunas para garantizar el monitoreo cuando se realicen los primeros secuestros geológicos, desde los proyectos piloto.

- **Divulgación del plan de implementación de la tecnología**: La divulgación debe hacerse en todos los ámbitos y usando los principales y mejores medios posibles. Es recomendable abordar el tema como uno de los más inmediatos de la política pública en la materia.

- **Vinculación con terceros involucrados**: La industria cementera, siderúrgica y química, así como la petrolera y eléctrica, la academia, las instituciones de investigación y las asociaciones gremiales de tópicos relacionados con el CCUS, deben vincularse en el compromiso de desarrollar tecnología en México.

- **Políticas de fomento a la participación de la iniciativa privada**: La tecnología de CCUS es demandante de bastantes recursos y por sí misma no es muy atractiva para la industria privada, por lo tanto, la iniciativa privada deberá formar parte de las políticas públicas, para crear mecanismos que hagan atractiva la adopción de la tecnología de uso y almacenamiento de CO_2.

- **Implementación del plan de red nacional para transporte de CO_2**: Se pretende construir una red de carbonoductos que faciliten el transporte de CO_2 desde lugares aislados del país, y probablemente donde no hay sitios cercanos de inyección con interés económico, hacía regiones de México o el extranjero donde sí lo sea.

- **Política nacional de CCS ready:** Sugiere que de forma oportuna deberá surgir una política pública que regule el que las nuevas instalaciones, estén adaptadas a un esquema de captura. Aunque en teoría este esquema implicaría una inversión adicional importante que, se reflejará en los costos de producción. A largo plazo conllevaría costos mucho menores con respecto a las instalaciones no adaptadas debido a que siempre serían objetivo de reconfiguraciones, sobre todo cuando el uso de esquemas de captura se torne más vinculante.

- **Mecanismos nacionales de financiamiento e incentivos para el desarrollo de la tecnología y cumplimiento de programas**: Las inversiones de infraestructura en la materia deben ser efectuadas por los recursos presupuestarios nacionales. Uno de los objetivos más importantes de organizar la detonación de esta tecnología en el país es obtener el reconocimiento de su importancia tanto por las autoridades hacendarias, como por los congresos y así lograr la asignación constante de los recursos económicos necesarios.

- **Mecanismos de financiamiento y fondeo internacional complementario y mercados de carbono**: Será necesaria la participación de mecanismos internacionales dedicados al combate de los gases de efecto invernadero. Se anticipa que en el futuro la concentración de estos gases en la atmósfera será mayor a la actual en la medida en que las metas anuales de mitigación no se acerquen a lo programado. Es necesaria una política pública al respecto para acceder sistemáticamente a esos fondos y crear condiciones en el país que aseguren el otorgamiento de los mismos.

- **Conformación del centro mexicano de CCUS**: Es necesario constituir un centro estratégico en innovación en el tema que permita garantizar la independencia tecnológica como medio de mejorar la oportunidad, el diseño, los costos de construcción y operación de infraestructura de CCUS.[1]

III.- Planeación: Hay un grupo de planeación de actividades, las cuales deberán desarrollarse en forma conjunta entre las 2 principales fuentes emisoras de CO_2 (generación de electricidad y producción hidrocarburos), con el objeto de aumentar las posibilidades de hacer del secuestro geológico del carbono, una industria económicamente viable. La generación de electricidad como principal productora de emisiones de CO_2 en conjunto con métodos de recuperación mejorada de hidrocarburos, donde el CO_2 se considera como la materia prima para este tipo de métodos. Sus etapas son:

- **Plan de captura y almacenamiento en plantas termoeléctricas**: Al ser la generación de electricidad la principal fuente de emisiones de CO_2, es necesario asociarla a un uso económico del CO_2 (como la recuperación mejorada de hidrocarburos), por lo que independientemente del dominio de la tecnología en la parte de captura, la industria eléctrica debe asociarse a la industria de petrolera. También se debe realizar investigación para localizar los sitios de almacenamiento potenciales, ya sea para periodos de emergencia cuando no exista la forma de vender el CO_2 a una industria que lo use como insumo, o bien cuando las condiciones tecnológicas y de precio del carbono sean tales como para que lo hagan atractivo por sí mismo.

- **Estimación de capacidades de almacenamiento en acuíferos salinos profundos**: Se debe continuar inventariando el **subsuelo** (acuíferos salinos profundos) profundo del país hasta conocer lo mejor posible todos aquellos lugares del territorio nacional que admitirían en forma segura y permanente, el almacenamiento del CO_2 de origen antropogénico.

- **Análisis de campos potenciales**: Se revisarán campos de diversas regiones y activos petroleros de México y analizarán características relativas de almacenamiento de CO_2. También se revisará la información geológica obtenida durante actividades exploratorias y de desarrollo de campos de PEMEX y CFE, para identificar acuíferos salinos profundos con las características requeridas para almacenamiento de CO_2.

- **Selección y priorización de campos:** Se seleccionarán y priorizarán campos que potencialmente cumplan con criterios de viabilidad técnica para procesos de recuperación mejorada de petróleo con CO_2. Se hará lo mismo con acuíferos salinos profundos que cumplan con requerimientos de almacenamiento de CO_2.

- **Estrategia de EOR[I]-CO_2**: Una vez priorizados los campos para CCUS, se definirá la estrategia de EOR-CO_2 de manera conjunta con la estrategia de captura de CO_2 en instalaciones de PEMEX y CFE.

- **Plan de EOR-CO_2**: Derivado de la estrategia se establecerá un plan de implementación de proyectos de EOR en los que se garantice el abasto de CO_2, necesario para el desarrollo de proyectos de captura en instalaciones de PEMEX y CFE.

- **Estrategia de consumo y abasto de CO_2**: Se documentarán las acciones y recursos necesarios para garantizar en el mediano y largo plazo el abasto del CO_2 capturado para los proyectos de recuperación mejorada.[1]

IV.- Fases de escalas piloto y demostrativa: Una vez iniciadas las fases anteriores se comenzará con actividades de proyectos piloto, seguidos del escalamiento demostrativo y después el comercial. No es necesario que las etapas anteriores hayan finalizado para iniciar las siguientes, pero si necesitan sentarse las bases que garanticen el correcto desarrollo de éstas y se puedan llevar a cabo sin interrupciones.

IVa.- Proyectos piloto en la industria de los hidrocarburos: Esta etapa representa al grupo de acciones que se deben ejecutar para verificar, primeramente en el laboratorio y posteriormente en un sector reducido representativo del yacimiento, la viabilidad técnica y económica de la inyección de CO_2 para incrementar el factor de recuperación de aceite. Se definirán los trabajos para la ejecución de

[I] EOR (Enhanced Oil Recovery) Por su traducción al español, recuperación mejorada de aceite.

pruebas piloto de EOR-CO_2, y el diseño de éstas se hará de manera conjunta con el diseño de pilotos de captura y el transporte de CO_2 al sitio de la prueba, para asegurar el suministro de los volúmenes requeridos. La etapa piloto de un proyecto EOR-CO_2 tiene una duración aproximada de 3 años para definir su aplicación masiva en el yacimiento.

Ambas etapas se pueden desglosar en los pasos siguientes, que son las más importantes:

- **Selección de sitios de prueba:** Las actividades de las pruebas piloto inician con la identificación y selección del yacimiento que cumpla con las características y condiciones necesarias para poder aplicar el método, además de tener viabilidad técnica y económica en la aplicación de EOR-CO_2 a escala comercial. También se deberá cuidar que las condiciones mecánicas de los pozos ubicados en el sector de prueba, y su infraestructura, permitan llevar a cabo las adecuaciones requeridas en la operación y monitoreo de la prueba.

- **Estudios de laboratorio**: Esta fase comprende la realización de estudios y caracterización del comportamiento de fases de las mezclas de CO_2 con los fluidos del yacimiento. Otras pruebas consisten en el desplazamiento de aceite con la inyección de CO_2, o bien mediante la inyección alternada de vapor de agua y CO_2 para caracterizar el desempeño del proceso a escala de laboratorio, entre otros.

- **Diseño de la prueba piloto**: El diseño normalmente se basa en la construcción de un modelo numérico que describe el proceso de inyección de CO_2 o la inyección alternada de éste con agua, en el sector de prueba. El modelo es una representación matemática del proceso de flujo de fluidos en el yacimiento, incluyendo la interacción con los fluidos inyectados y la hidráulica del flujo en los pozos. En el diseño se definen las condiciones óptimas bajo las cuales se deberá conducir y dar seguimiento a la prueba piloto, de tal forma que se obtenga información requerida en la evaluación de la viabilidad técnica y económica de la aplicación comercial del proceso.

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

- **Operación, seguimiento y evaluación**: Consiste en la implementación del programa de inyección producción de fluidos en los pozos del sector piloto, conforme al diseño y el monitoreo de datos de presión, inyección producción y composición de los fluidos producidos durante la prueba. El ajuste del modelo numérico del sector de la prueba piloto con los datos obtenidos durante la prueba permitirá estimar los beneficios de la inyección de CO_2 en el mediano y largo plazo, en términos de recuperación adicional de petróleo. También se podrá estimar la cantidad de CO_2 que permanecerá atrapado en el yacimiento y de igual forma, los cambios de concentración de CO_2 en la corriente de gas producido, lo que permitirá definir el programa de manejo de CO_2 en superficie, con respecto a la separación de éste y el gas hidrocarburo, así como su reutilización (reinyección) en yacimiento.[1]

IVb.- Proyecto piloto en la generación de electricidad: El proyecto piloto en plantas de generación eléctrica considera la captura de para conocer la viabilidad técnica y económica. Dadas las condiciones actuales en la infraestructura de dichas plantas la tecnología de captura a aplicar es la de postcombustión. Generalmente, se emplean soluciones acuosas con aminas primarias. Esta etapa se desglosa también en las siguientes fases:[1]

- **Selección de sitios de planta a base de gas o carbón:** Primero se deben identificar las centrales que cumplan con las características necesarias para adaptar una planta de separación y captura de CO_2. Posteriormente se seleccionará en cuál de ellas se llevará a cabo la prueba de captura de CO_2.
- **Selección de tecnología de captura**: Se deberán considerar diferentes tecnologías de captura empleadas en el mundo, y seleccionar la que mejor se adapte a las plantas eléctricas en México, tomando en cuenta análisis de costo beneficio.

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

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

- **Construcción y puesta en servicio**: Esta fase consiste en la construcción de la planta piloto y en la aplicación de pruebas que permitan demostrar que la planta funciona.

- **Operación y obtención de datos para escalamiento**: una vez construida la planta piloto, se procederá a su operación por personal de CFE y con base en el monitoreo del proceso de captura de CO_2 se harán evaluaciones periódicas de desempeño que permitan determinar la eficiencia de captura, penalización energética y costos a nivel piloto y en general, los parámetros que se deben considerar para un escalamiento futuro.

- **Cierre y desmantelamiento**: Al concluir con la etapa de la prueba piloto se procederá al cierre y desmantelamiento de la unidad de separación y captura de CO_2.[1]

IVc.- Proyecto demostrativo: El proyecto inicia una vez terminada la etapa piloto. Las siguientes son las fases más importantes:

- **Caracterización del sitio de inyección**: Consiste en el modelado a detalle del sitio de inyección. Durante la selección se deberá cuidar que las condiciones mecánicas de los pozos ubicados en el sector de prueba, y su infraestructura superficial, permitan llevar a cabo las adecuaciones requeridas en la operación y monitoreo de la prueba.

- **Estudio de factibilidad y diseño**: esta etapa consiste en el análisis de los resultados de la planta piloto y su escalamiento con estudios de laboratorio, además de la adquisición de datos adicionales, para reducir la incertidumbre de la aplicación a una escala mayor. Deberán obtenerse especificaciones técnicas y económicas que se integren a las bases de licitación del proyecto.

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

- **Estudios y permisos ambientales**: se deberán realizar los estudios ambientales y permisos necesarios ante las autoridades correspondientes para la construcción de la planta de captura y la prueba piloto.
- **Comunicación e involucramiento social local**: Todo proyecto de nueva creación debe comunicarse a la población involucrada, por lo que es necesario establecer un área de divulgación y comunicación para las comunidades que se localicen en el entorno de la planta de una manera profesional.[1]

V.- Escala comercial: Cuando se superen las etapas piloto y demostrativa, se considera que será posible explotar la tecnología CCUS a escala comercial. Se podrá expandir su uso a toda la industria emisora fija de CO_2. La última parte de las fases demostrativas, tanto de la industria petrolera como la eléctrica se traslapan en la fase comercial, lo que significa es que se ha dominado la tecnología de captura y almacenamiento en volúmenes importantes de emisiones. El término comercial se refiere a la masificación del uso de la tecnología, y se compone de los siguientes pasos:

- **Plan de escalamiento:** Consiste en acciones que deberán implantarse para extender la aplicación de CCS-EOR a escala de campo, una vez que su viabilidad técnica, ambiental, social y económica sea verificada con los resultados de la prueba piloto.

- **Estudios complementarios:** Incluyen estudios de laboratorio, y en lo general en la adquisición de datos y muestras adicionales para reducir la incertidumbre de la aplicación a escala de campo.

- **Diseño de la aplicación a escala de campo:** Consiste en diseñar las condiciones óptimas, técnicas y económicas de la aplicación de EOR-CO_2 a escala de campo. El diseño se basa en el uso del modelo numérico del campo-yacimiento-pozos, actualizado y adaptado con los datos y resultados del piloto. En esta fase se determina el número de pozos inyectores y productores, y su ubicación en el yacimiento, así como los ritmos de inyección de CO_2, agua en algunos casos, y producción de aceite en los pozos.

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

- **Operación de proyectos CCS-EOR:** Contempla la implementación del programa de captura de CO_2, inyección-producción de fluidos en pozos, conforme a diseño, y el monitoreo de la toma de datos de presión, inyección-producción y composición de los fluidos producidos durante la prueba. La verificación del comportamiento previsto con los resultados obtenidos durante la aplicación es una tarea fundamental, la causa de potenciales desviaciones deberá detectarse oportunamente para aplicar, en su caso, las medidas correctivas que permitirán mantener la operación del proceso en condiciones óptimas.

- **Identificación de plantas prioritarias para captura:** Se deben tener identificados los puntos emisores, que ya sea por el volumen de CO_2 que generan, por la cercanía a un punto de inyección, o por la rentabilidad del uso del CO_2 en un proceso productivo. Subsecuentemente, deberían incorporarse a un sistema nacional de captura, aquellas que cumplen estas condiciones en menor o mayor medida.

- **Estudio de factibilidad de carbonoductos:** Es necesaria una red de carbonoductos que haga viable económicamente el traslado de un punto de emisión a uno de secuestro. En esta etapa del proceso se deberá llevar a cabo un análisis técnico económico que permita desarrollar dicha red de ductos de carbono que hagan su construcción lo más eficiente y rentable posible.

- **Construcción de red de transporte CO_2:** La construcción de la red analizada y diseñada en el paso anterior deberá dar lugar a la construcción de los ductos que hagan posible el transporte del CO_2 oportunamente para cuando la captura en todo tipo de industria emisora se masifique.

- **Construcción y operación comercial CCUS y CCS-EOR**: Si la industria de CCUS, efectivamente alcanza su madurez, hará falta que cada país tenga un esquema de asociación de puntos de emisión con sitios de captura. Los sitios de captura se asociarán a la recuperación mejorada de hidrocarburos o a sitios de captura geológica sin rentabilidad económica adicional. Esto representa la etapa final del MRT. En esta etapa, en la que la tecnología de captura y almacenamiento geológico se constituirá como la opción que permita seguir utilizando combustibles fósiles sin que eso implique aumentar la proporción de CO_2 en la atmósfera, por lo menos parcialmente.

- **Comercialización**: Conforme transcurra el tiempo, se espera que el CO_2 eleve su precio comercial. Este aspecto es la razón para pensar que en la fase final del proceso de MRT sea el relativo a participar en un mercado nacional e internacional de emisiones.

- **Monitoreo, reporte y verificación**: Una vez dominada la tecnología CCUS y la industria en el país sea madura, será necesario el apego a una normatividad, desarrollada previamente, para garantizar que el CO_2 secuestrado en medios geológicos permanecerá bajo de la superficie. Para asegurarlo, deberán llevarse a cabo procedimientos oficiales de monitoreo certificados por estándares internacionales, verificarlos de forma veraz y emitir reportes que permitan que la sociedad pueda conocer el grado de evolución de cada depósito, así como aplicar las medidas necesarias para la corrección de la operación de los depósitos.[1]

3. Hipótesis y Objetivos

3.1. Hipótesis

Durante los últimos años se ha observado un incremento significativo en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en el mundo, el cual es conocido como un gas de efecto invernadero y, considerado como uno de los principales causantes del cambio climático, provocando otros efectos negativos al medio ambiente, como la reducción en la calidad del aire, que consecuentemente produce daños directos a la salud de los humanos.

Actualmente, para combatir las emisiones de este gas y sus efectos negativos, se busca desarrollar e implementar proyectos de almacenamiento del dióxido de carbono, a través de su inyección y reacción, principalmente con basaltos, generando carbonatos de calcio. En México se tiene una gran cantidad de basaltos que pueden ser empleados para la inyección de CO_2, resultando en su transformación a roca caliza.

3.2. Objetivos

Llevar a cabo el análisis para conocer la factibilidad de realizar el almacenamiento de dióxido de carbono, a través de su inyección en basaltos mexicanos.

Objetivos Específicos:

- Comprender el funcionamiento del método CarbFix de eliminación de CO_2, sus alcances, fortalezas y debilidades.
- Identificar las principales zonas emisoras de CO_2 en el país, así como las formaciones geológicas existentes que rodean estas zonas.
- Comparar el método CarbFix con otros disponibles, para determinar la factibilidad del desarrollo de proyectos similares en México.

4. Proyecto CarbFix en Islandia

4.1. Introducción

El proyecto CarbFix es un programa piloto académico-industrial, desarrollado para evaluar la factibilidad del secuestro mineral *in-situ* de CO_2 en rocas basálticas. CarbFix se conecta con la planta de energía geotérmica Hellisheidi al sur-oeste de Islandia, permitiendo la captura del CO_2 emitido, además de su transporte y su secuestro mineral. El proyecto CarbFix fue formalmente presentado el 29 de septiembre de 2007, el cual es un consorcio constituido por 4 socios:

- **Orkuveita Reykjavíkur (OR)**, opera el sistema de calefacción geotérmico, una red eléctrica y un sistema de distribución de agua, sirve al 67% de la población de Islandia. OR es el principal patrocinador del proyecto, provee la planta piloto separadora de gas (fuente del CO_2), tuberías, el sistema de inyección, pozos de inyección y monitoreo, la logística y administración, la ciencia y tecnología geotérmica. Asimismo, muchos de los científicos, ingenieros y técnicos trabajan en este proyecto.

- **Iceland Geosurvey (ISOR)**, es uno de los principales consultores de OR. Mantiene una base de datos de información geológica, geofísica y geotérmica del área de Hengill. ISOR juega un papel importante en el monitoreo y la verificación de la inyección de CO_2, además de que ISOR está designado para conducir un programa de monitoreo de gas en el suelo y detectar posibles fugas de CO_2 a la superficie, antes durante y después de la inyección.

- **Mannvit Engineering, Iceland (Mannvit)**, Mannvit participa en el desarrollo, diseño y pruebas del sistema de inyección de CO_2.

- **Lawrence Berkeley National Laboratory USA (LBNL)**, trabaja en el modelado de yacimientos geotérmicos. Modelan el transporte reactivo, empleando las propiedades de los basaltos en Islandia, para predecir el éxito de la inyección de CO_2 a largo plazo, así como la interpretación de datos de campo y experimentales.



Figura 10.- CarbFix está conectado con la planta geotérmica Hellisheidi al suroeste de Islandia. El sitio de inyección de CarbFix se encuentra en la parte derecha de la figura.[31]

De manera general, el proyecto CarbFix consta de una planta geotérmica generadora de energía que produce grandes emisiones de CO_2, la cual es indispensable para suministrar energía a una buena parte de la población en Islandia, por lo que independientemente de la cantidad de emisiones que genere no puede detener sus operaciones. Es por esto que se creó el proyecto, cuyo propósito es reducir la mayor cantidad de emisiones de CO_2 y se diseñó un sistema de ductos para transportar el CO_2 producido a una zona cercana, donde el subsuelo está conformado principalmente de basalto y otras rocas de origen ígneo.

La siguiente etapa consta de la inyección de CO_2 (secuestrado de la planta geotérmica y transportado a las instalaciones del proyecto CarbFix), para lo cual es necesario disolver el gas en agua, y formar ácido carbónico (H_2CO_3). El H_2CO_3 es inyectado en un pozo con una profundidad de 1,997 m y al entrar en contacto con las rocas basálticas de la formación, comienza una reacción donde los cationes divalentes[I] de las rocas se disuelven y forman carbonatos minerales. Las pruebas de inyección están diseñadas para inyectar aproximadamente 2,000 toneladas de CO_2 anualmente. Las principales reacciones entre el CO_2-fluido-roca, son las siguientes:

$$CO_2\ (g) \longrightarrow CO_2\ (ac)$$

$$CO_2\ (ac) + H_2O \longrightarrow HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CO_3^{2-} + 2H^+$$

Esquema de reacción 1.- Disolución y disociación de CO_2 en agua.

$$(Na, Ca)Al_{1.7}Si_{2.3}O_8\ (s) + 6.8H^+ \longrightarrow (Ca^{2+}, Na^+) + 1.7Al^{3+} + 2.3SiO_2\ (ac) + 3.4H_2O\ (l)$$

$$(Mg, Fe)_2SiO_4\ (s) + 4H^+ \longrightarrow (Mg, Fe)^{2+} + SiO_2\ (ac) + 2H_2O\ (l)$$

Esquema de reacción 2.- Disolución mineral de basaltos.

$$(Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}) + CO_3^{2-} \longrightarrow (Ca, Mg, Fe)CO_3\ (s)$$

Esquema de reacción 3.- Precipitación mineral.[32]

Tras la inyección de CO_2 se esperaba que en un plazo de entre 2 y 3 años, éste se mineralizara generando rocas carbonatadas a partir de las rocas basálticas, cumpliendo así el objetivo del proyecto al eliminar de manera permanente las emisiones generadas por la planta generadora de electricidad en Islandia.

[I] Especies iónicas, que presentan carga positiva originadas por la pérdida de electrones en átomos regularmente de baja electronegatividad, como los metales. Algunos de los cationes divalentes más comunes son: magnesio (Mg^{+2}), calcio (Ca^{+2}), manganeso II (Mn^{+2}) y hierro II (Fe^{+2}), presentes en las rocas basálticas.[46]

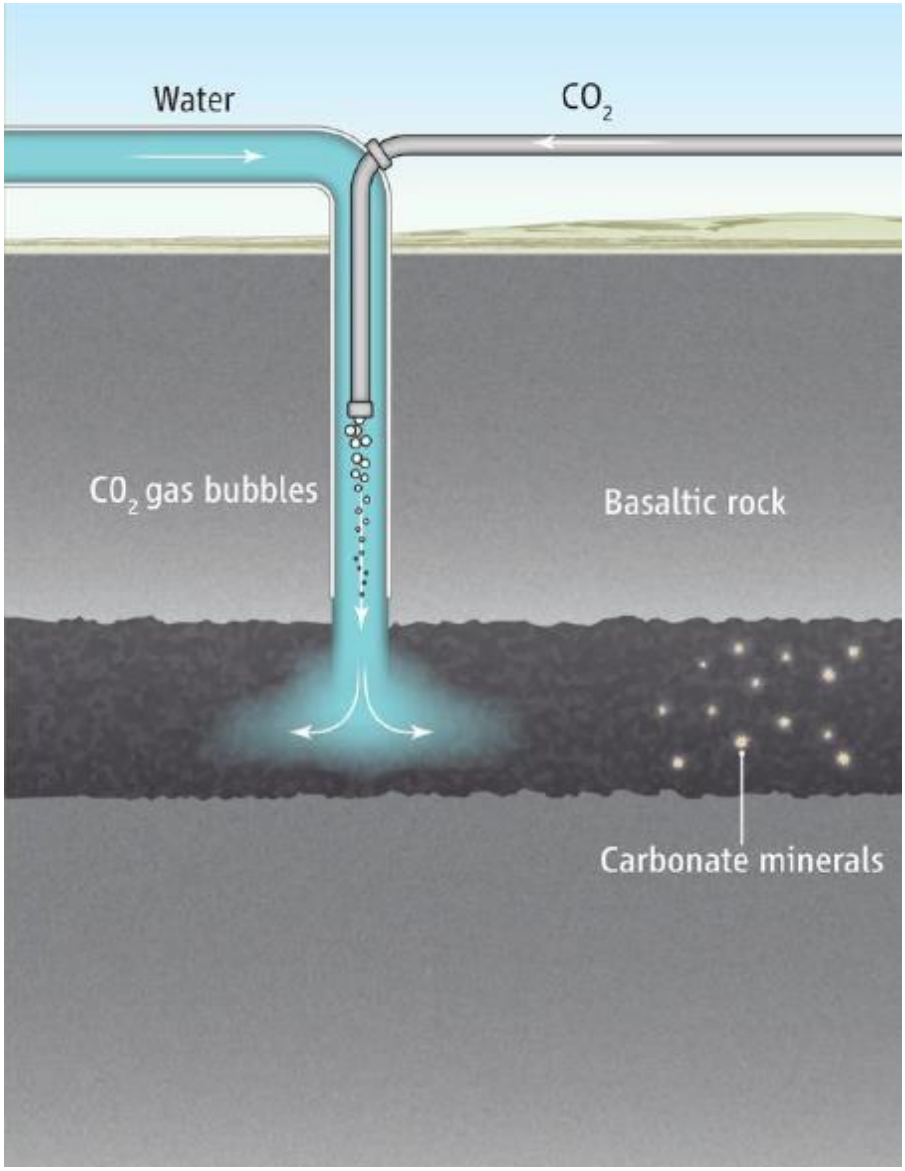


Figura 11.- Diagrama de la inyección de CO_2 y agua a la formación basáltica.[33]

4.2. Datos de las instalaciones de la planta Hellisheidi y de las utilizadas para el proyecto CarbFix

En promedio, la emisión anual de gases debido al uso de la planta geotérmica en Hellisheidi y Nesjavellir, es de aproximadamente 61,800 toneladas de CO_2 y 28,200 toneladas de H_2S. La planta geotérmica en Hellisheidi cuenta con estaciones para separar los gases geotérmicos en gases solubles (CO_2 y H_2S) y gases no solubles (H_2, N_2 y Ar). La planta Hellisheidi fue equipada en 2006 con 2 turbinas de 45 MW_e cada una, en 2007 fue añadida una turbina de baja presión de 33 MW_e que utiliza vapor de una cámara de agua geotérmica separada; en 2008 se agregaron otras 2 de 45 MW_e y una más fue añadida en 2011. La capacidad total instalada en la planta de energía Hellisheidi es de 303 MW_e y 133 MW_{th}.

La planta no cuenta con un equipo de medición directa de emisiones, la cantidad y concentración de los gases es estimada de la composición del vapor de todas las turbinas, una pequeña porción de los gases se pierde en las bombas de vacío de los condensadores. Una medición directa utilizando un cromatógrafo de gases con muestras obtenidas de los condensadores también indica que una cantidad de H_2S y CO_2 se pierde en las bombas de vacío.

En 2012 las emisiones anuales de CO_2 en Hellisheidi fueron de 43,200 toneladas, mientras que las emisiones de H_2S fueron de 16,900 toneladas. Debido al incremento en las emisiones respecto a años anteriores[I], Reykjavík Energy desarrolló 2 proyectos, uno de ellos es SulFix que busca reducir las emisiones de H_2S y el otro es CarbFix que busca reducir las emisiones de CO_2. Para esto se construyó una estación de separación de gas junto a la planta de energía Hellisheidi y así tratar el gas geotérmico, principalmente para su disolución en agua (CO_2 y H_2S). La separación se realiza mediante 3 métodos, un sistema de membranas para remover H_2 y N_2, un sistema de torres de absorción y desorción que separan los gases solubles del resto de gases geotérmicos y una columna de destilación que separa el CO_2 del H_2S. Los 3 sistemas pueden utilizarse en combinación o funcionar por separado.[34]

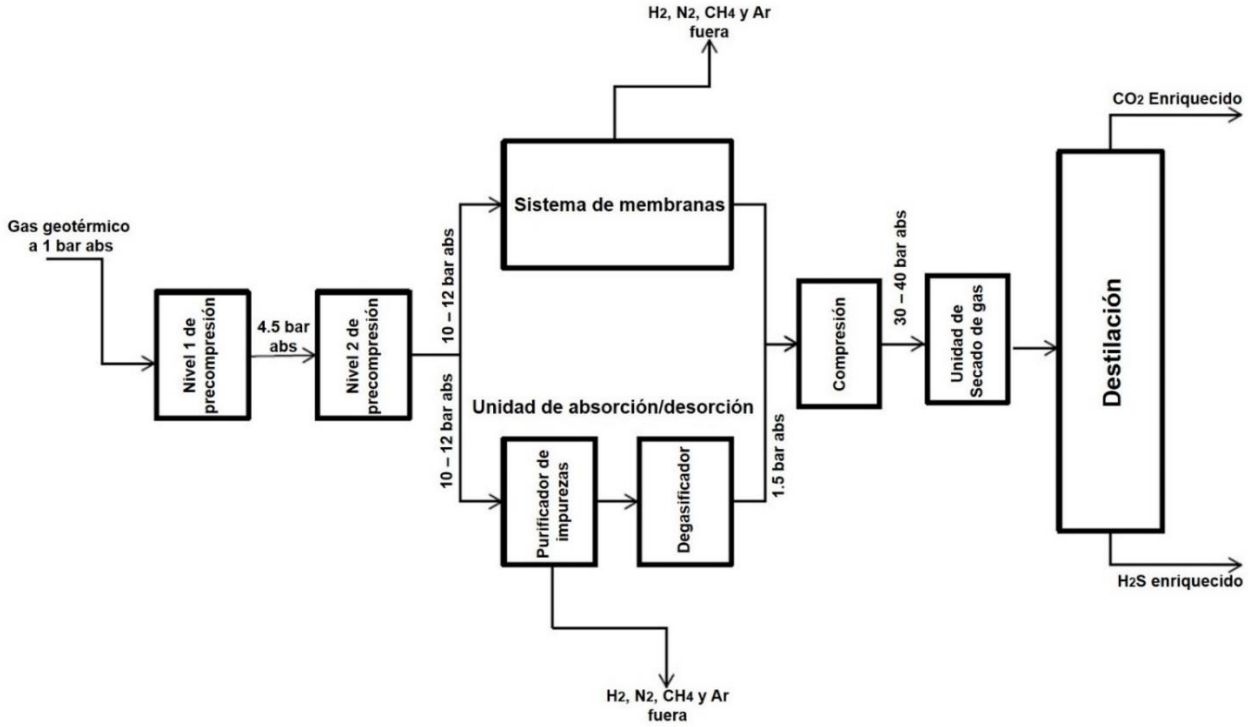


Figura 12.- Diagrama simplificado de la estación de separación de gas operada por la planta de energía en Hellisheidi, Islandia.[34]

Uno de los mayores problemas fue el de corrosión, observado en la columna de destilación, debido a la naturaleza del H_2S y las mezclas de este gas con agua. La operación tuvo que detenerse debido a corrosión severa en el elemento enfriador del fondo de la columna. Las operaciones se suspendieron en agosto de 2010 y se reanudaron a finales de octubre del mismo año una vez que se reemplazaron algunos componentes y equipos. Sin embargo, debido a fallos constantes en algunos componentes, la operación se volvió a suspender a principios de noviembre del mismo año y finalmente se reanudó a principios de 2011. Una vez separado el CO_2 de los demás gases, éste es comprimido y enfriado, en un 98% de pureza con pequeñas cantidades de H_2S. Una vez separado y purificado el CO_2 se transporta a bajas presiones desde la planta de purificación de gas mediante una tubería de polímero al pozo de inyección HN-2, que se encuentra aproximadamente a 3 kilómetros de distancia al suroeste de la planta Hellisheidi (ver figura 13).

El sitio de inyección está conectado a la red nacional eléctrica, cuenta con bombas subsuperficiales instaladas en el subsuelo que tienen como función la inyección de fluidos y el monitoreo de los pozos.

[I] Las emisiones de CO_2 y H_2S comenzaron a monitorear y registrar a partir del año 2006, por lo que anterior a este año no existe documentación sobre las emisiones en la planta Hellisheidi.[34]

Se utilizó el trazador; fluoresceína sódica ($C_{20}H_{11}O_5Na$) para caracterizar el flujo de agua subterránea y estimar el volumen disponible en el yacimiento para la inyección de CO_2. Las pruebas de trazador se realizaron para monitorear la presencia de fugas del CO_2 inyectado hacia la superficie. Estas pruebas comenzaron el 10 de junio de 2008.

La infraestructura en el sitio de inyección del proyecto CarbFix está distribuido de la siguiente manera: en el pozo HN-01 se disuelve el CO_2 en agua (formando H_2CO_3), desde el pozo HN-02 se inyecta la solución (cuenta con 1,997 m de profundidad). Los pozos HN-04, HK-34, HK-31 y HK-26 son pozos profundos de monitoreo (localizados entre 800 y 1,300 m de profundidad), y los pozos HK-12, HK-25, HK-07 y HK-13 son pozos de monitoreo superficiales (se encuentran entre 80 y 140 m de profundidad).

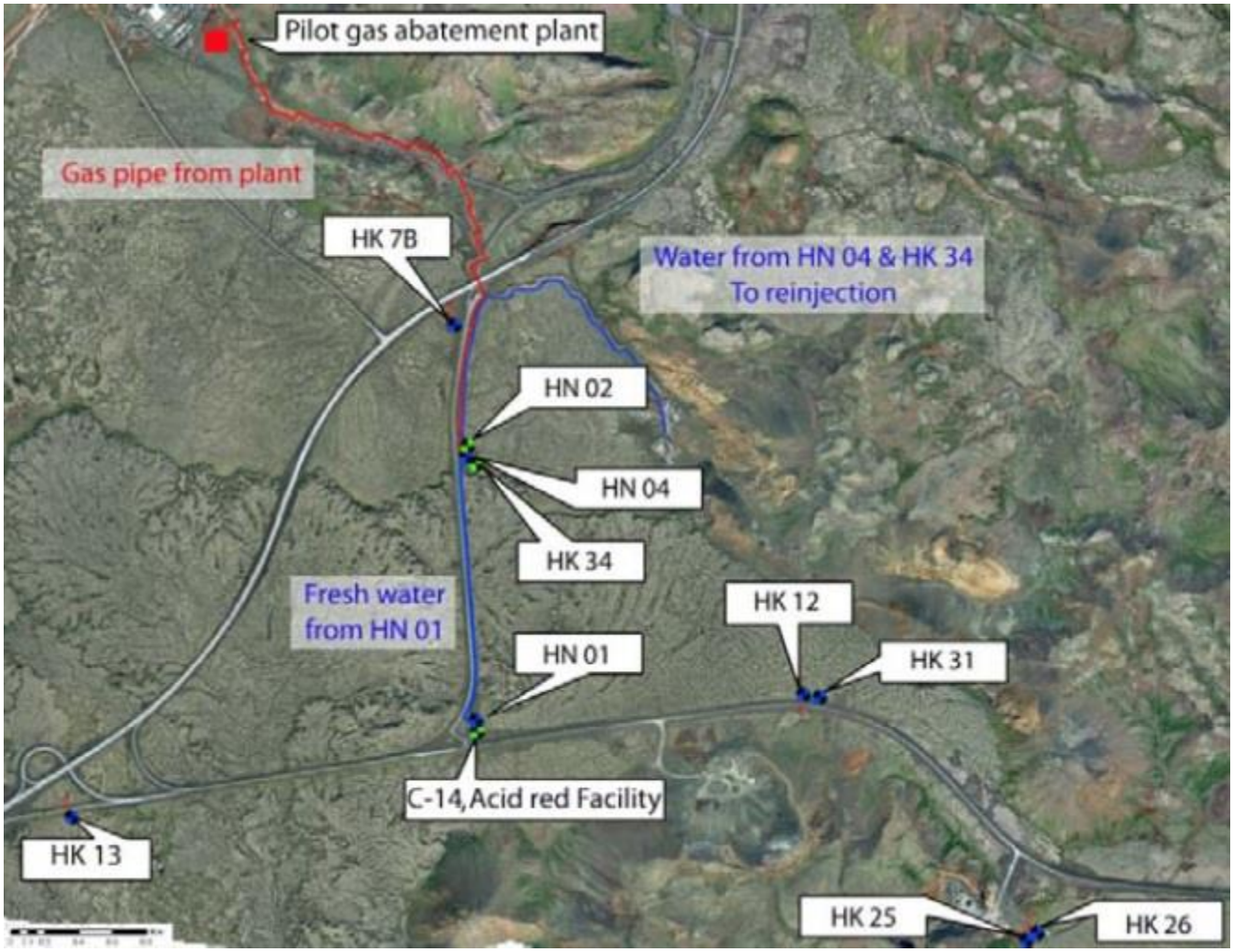


Figura 13.- Mapa de la distribución del pozo inyector, los de monitoreo, la planta Hellisheidi y la fuente de agua.[35]

En el centro de almacenamiento de Hellisheidi, la disponibilidad de un amplio suministro de agua hace posible la co-inyección suficiente de agua para disolver el CO_2 durante el proceso de inyección. La disolución del CO_2 se acelera al incrementar su presión y el área de interface entre el CO_2 y el agua. En cuanto al proceso, primero se inyecta agua a una profundidad aproximada entre 300 y 350 m, donde posteriormente el gas es añadido utilizando un burbujeador que crea pequeñas burbujas de gas. Se demostró que todo el CO_2 inyectado es disuelto antes de su infiltración dentro del acuífero objetivo a una profundidad de 520 m.

La disolución de los gases durante la inyección promueve las reacciones roca-fluido necesarias para atrapar el CO_2 en los minerales de la formación. Se inyectaron dos tipos de gases, CO_2 puro y una mezcla de CO_2 con otros gases (75% CO_2, 24% H_2S y 1% H_2), provenientes de la planta Hellisheidi. Los principales componentes utilizados en el sistema de inyección son los siguientes:

- Sistema de suministro de gas comprendido por:

    a) Tanque de almacenamiento de gas para el CO_2 puro.
    b) Una estación de separación de gas para tratar los gases geotérmicos antes de su inyección. Esencialmente involucra separar los gases geotérmicos pobremente solubles como el H_2, N_2, CH_4, Ar y O_2 de los más solubles como el CO_2 y el H_2S.
- Una tubería de 3.3 km que transporta gases a una presión de entre 24.67 y 29.6 atm, hasta el sitio de inyección menos profundo.

- Una tubería de 3 km que transporta gases a una presión de 7.89 atm hasta el sitio de inyección más profundo.

- El pozo de inyección HN-02 está localizado en el sitio de inyección menos profundo, donde los gases son disueltos en agua a 300–350 m dentro del pozo. Cabe destacar que el pozo es más profundo (1,997 m) pero cuenta con diferentes intervalos de inyección.

- Instalaciones de mezclado de gas, donde los gases y el agua son mezclados en superficie, a una presión de 7.89 atm en la parte más profunda del sitio de inyección.

- El pozo de inyección HE-08 se encuentra en el lugar más profundo del sitio de inyección.

- Pozo de suministro de agua HN-01 se encuentra en la parte menos profunda del sitio de inyección, que provee agua para disolver los gases durante la inyección.

- El sistema de mezclado de trazas se localiza en la estación de separación de gases e instalaciones cercanas al pozo de inyección.

4.3. Toma de muestras y recolección de datos antes de la inyección de CO_2

Durante las primeras 4 semanas del proyecto (a partir del 10 de enero de 2008) se tomaron 2 muestras[l] por semana del pozo HN-04, y se tomó una muestra por semana de los pozos HK-12, HK-31 y HK-26. Posteriormente, de julio hasta finales de octubre de 2008 se tomaron muestras semanales de los pozos profundos HN-04, HK-34, HK-31 y HK-26. Mientras que las muestras de HN-01 y de HK-07, HK-12, HK-13 y HK-25 fueron tomadas una vez al mes. De noviembre a diciembre de 2008 las muestras fueron tomadas de los pozos HN-04 y HK-34 una vez a la semana y en el resto de los pozos, las muestras fueron tomadas una vez al mes. Cabe resaltar que en noviembre y diciembre del mismo año no fue posible tomar muestras de los pozos HK-13, HK-07 y HK-25 debido a dificultades ocasionadas por el clima.[36]

[l] De las pruebas de trazador que utilizaron SF_6 y fluoresceína de sodio.



Figura 14.- Toma de muestras en el pozo HN-01 durante el invierno.[35]

Desde julio de 2008 la química del agua subterránea en el sitio de inyección ha sido estudiada regularmente, se han analizado y medido la temperatura, el pH, alcalinidad, conductividad, carbón orgánico disuelto, nutrientes y los isótopos. Estos análisis forman parte de la caracterización completa del lugar para el depósito del CO_2.[35]

Para estudiar los posibles efectos de la inyección de CO_2 al subsuelo se realizaron modelos de simulación, principalmente, modelos geoquímicos e hidrológicos que también ayudaron a cuantificar la cantidad de CO_2 que se podría mineralizar. Como apoyo a estos modelos, también se realizaron estudios mediante registros petrofísicos de temperatura y medidores de flujo de molinete, que posteriormente servirían para definir la profundidad óptima del pozo inyector de ácido carbónico (H_2CO_3).

Adicionalmente, se realizaron experimentos de laboratorio para evaluar la termodinámica y la cinética de las rocas basálticas. También se utilizó software para desarrollar modelos de flujo de CO_2; con esta información se desarrolló una base de datos para reacciones minerales de interés en el proyecto CarbFix. Los modelos de las reacciones químicas también fueron acoplados al modelo de flujo de CO_2 para poder simular diferentes escenarios durante su inyección.[36]

Con ayuda de los modelos y simulaciones, se llegó a la conclusión de que la velocidad del agua subterránea es significativamente más baja de lo esperado, por lo que fue necesario incrementar la velocidad del flujo después de que la inyección de CO_2 comenzó. La reacciones roca-fluido fueron acopladas a los modelos hidrológicos, con esto los modelos preliminares confirmaron la disolución de los minerales basálticos primarios así como la precipitación de los carbonatos. La abundancia de minerales secundarios es altamente dependiente de la temperatura, la tasa de flujo y el CO_2 presente.

En cuanto al sistema de inyección de fluidos, desde el pozo HN-02 se realizaron pruebas de bombeo, que demostraron un flujo de agua subterránea relativamente lento en el sitio de inyección. En enero de 2009 se anunció que una cantidad diez veces menor que la anticipada de CO_2 estaría disponible para el proyecto CarbFix por lo que se realizaron cambios en el diseño del sistema de inyección.

4.4. Plan de monitoreo del proyecto CarbFix

El plan de monitoreo para este proyecto está integrado por tres partes, el monitoreo en superficie, en subsuelo y la atmósfera.

El monitoreo en superficie involucra mediciones de flujo de CO_2, muestreo de gases inyectados de la planta de energía y registros de presión y temperatura en la cabeza de los pozos. Los sitios de monitoreo se colocaron cerca de fracturas en el yacimiento de basaltos y a lo largo de algunos caminos cerca de éste. Las mediciones se llevaron a cabo en 165 puntos diferentes en la plataforma de inyección del pozo HN-02, en los pozos observadores HN-04 y HK-34, en las lavas del Holoceno, a lo largo de la antigua carretera de Hellisheidi, y en la carretera Threngsli.

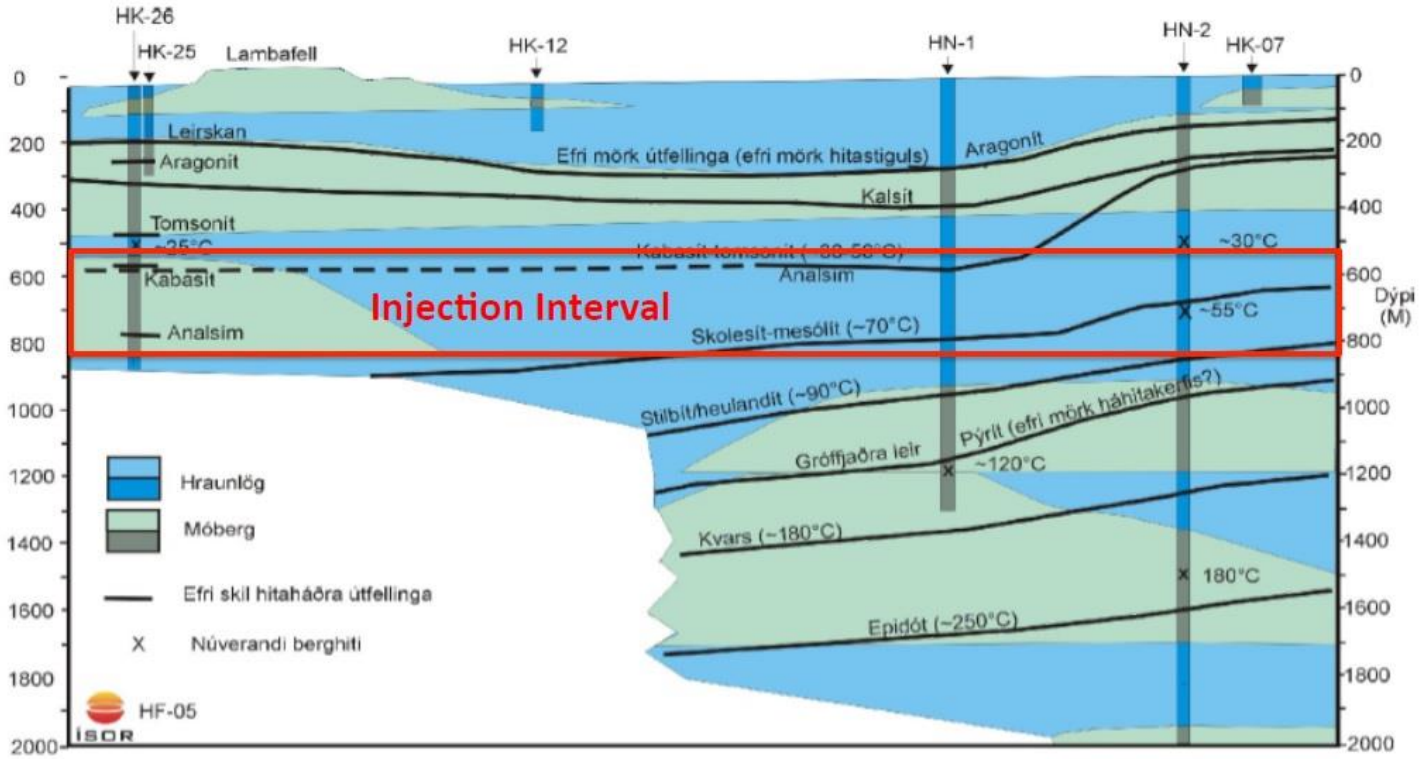


Figura 15.- Diagrama del subsuelo en el sitio de inyección del proyecto CarbFix.[32]
Hraunlög – Flujo de lava; Móberg – Toba[I]; Efri skil hitaháöra útfellinga – Precipitación de calor en el flanco superior;
X Núverandi berghiti – Roca sedimentaria existente; Lambafell – Campo de lava; Kvars – Cuarzo;

El monitoreo subterráneo involucra el transporte y la reactividad del CO_2 disuelto, así como la cantidad de CO_2 almacenado en distintas formas. Trazadores reactivos y no reactivos se inyectaron de manera simultánea con el CO_2 disuelto en agua con el propósito de monitorear lo antes mencionado. Transductores de presión[II] fueron instalados en la mayoría de los pozos monitores y en el pozo inyector.

[I] Roca ligera y porosa formada por la consolidación de cenizas volcánicas.
[II] Aparato que transforma la presión registrada en una señal eléctrica análoga.

En cuanto al monitoreo atmosférico, en la estación de inyección opera una estación del clima que realiza monitoreo continuo del CO_2 de la atmósfera. La estación está equipada con un detector de CO_2 que puede detectar fugas mayores durante la inyección y es utilizada para validar la disolución de CO_2 en el agua de inyección. La estación mantiene un seguimiento de todos los parámetros clave (presión, flujo, temperatura y conductividad) durante la inyección y provee de la información en línea a todos los colaboradores de proyecto.[36]

4.5. Inyección de CO_2, resultados y datos obtenidos

El objetivo de en esta etapa es inyectar agua y CO_2 a una profundidad de entre 300 y 350 m, primero suministrando agua y después burbujeando CO_2 en esta. Una vez que el CO_2 es disuelto se infiltró al acuífero objetivo, que se encuentra a 520 m de profundidad.

Las inyecciones de gas llevadas a cabo en el proyecto fueron las siguientes:

- 1.1 toneladas en marzo de 2011
- 174.6 toneladas entre enero y marzo de 2012

Se inyectaron mezclas de gas (75% de CO_2, 24% de H_2S y 1% de H_2) de la planta de energía de Hellisheidi en la parte menos profunda del yacimiento (400 – 800 m de profundidad):

- 60 toneladas entre junio y agosto de 2012
- 3.5 toneladas en enero de 2013

Mezclas de gas (64% de CO_2, 35% de H_2S y 1% de H_2) provenientes de Hellisheidi inyectadas en la parte más profunda del yacimiento (> 800 m de profundidad):

- 100 toneladas entre septiembre y diciembre de 2012

La inyección de CO_2 puro de enero a marzo de 2012 fue altamente exitosa. Después de los problemas iniciales causados por taponamiento en el rociador (localizado al final de la tubería de gas entre 300 y 350 m del pozo de inyección), el flujo de gas dentro de los pozos fue relativamente estable. El taponamiento en los rociadores provocó un fuerte decremento en el flujo de gas al principio de la inyección, de enero 17 de 2012 hasta el 2 de febrero del mismo año.

El propósito del rociador es asegurar que las burbujas de gas que dejan la tubería sean lo suficientemente pequeñas para acelerar el proceso de disolución. Desafortunadamente también actúa como un filtro al final en la tubería. Para prevenir taponamientos, el diámetro promedio de los hoyos en el rociador fue incrementado de 0.01 mm a 1 mm. Una vez que se incrementó este diámetro el flujo se estabilizó.

En otoño de 2012 se dañó la tubería que transportaba el gas de la estación de separación al sitio de inyección, y para cuando los trabajos de reparación finalizaron el nivel de agua aumentó de manera considerable en el pozo de inyección, dando como resultado una reducción en la transmisibilidad del pozo.[33]

Las pruebas realizadas mostraron que el índice de inyectividad se redujo de 2 kg/s/bar a 0.2 kg/s/bar. La transmisibilidad del pozo fue recuperada a través del bombeo de aire en el pozo, donde se descubrió

que la actividad microbiana (bacterias sulfatoreductoras) fue responsable del taponamiento del pozo a través de la formación de sulfuro de hierro (FeS) que formaban una precipitación similar a un gel.

Para verificar que la disolución de CO_2 fue exitosa durante la inyección, se utilizó una cámara digital en el pozo durante la inyección del CO_2, con fecha del 16 de marzo de 2011, a una profundidad de 90 m a 550 m. Los cálculos de balance de masa indican que el tiempo promedio de residencia del CO_2–H_2O en el pozo a una profundidad de 540 m, fue de 4 minutos y 30 segundos. La solubilidad se logró en menos de 5 minutos.

Algunos de los resultados obtenidos indican que el 90% del CO_2 inyectado fue mineralizado en menos de un año, además de que no se detectaron fugas de gas del yacimiento. Los análisis también mostraron que la disolución de los basaltos y minerales secundarios incrementa el pH del agua cargada con CO_2 inyectada, de 3.8 a aproximadamente 6.5. El agua viajó del pozo de inyección al de monitoreo, la distancia entre ambos pozos es de 125 m a una profundidad de 520 m, después de 17 días.

El agua quedó saturada con carbonatos de hierro y con calcita después de la inyección, así como la concentración de muchos metales se incrementó conforme el CO_2 disuelto interactuaba con las rocas de la formación. Cabe mencionar que la concentración de dichos metales está por debajo de los límites permisibles de agua potable.

Se inyectaron trazadores geoquímicos junto con el CO_2, para determinar el flujo de los fluidos y validar el grado de mineralización en el sub-suelo. Por ejemplo, durante el periodo de enero a marzo de 2012 se inyectaron175 toneladas de CO_2 junto con el trazador reactivo, ^{14}C, y otro trazador conservador SF_6. Asimismo, en el periodo de junio – agosto de 2012 se inyectaron 65 toneladas de una mezcla de CO_2, H_2S y H_2, junto con el trazador de ^{14}C, SF_5–CF_3 y Rodamina 6G. En este caso, los trazadores conservadores permiten la cuantificación de la disolución de las mezclas inyectadas en el yacimiento y también pueden ser utilizados para sustraer el factor de disolución de la señal obtenida mediante el trazador de ^{14}C.

En cuanto al análisis químico de las muestras, la frecuencia de muestreo se realizaba 2 veces por semana durante las inyecciones y en los meses posteriores se realizaba uno semanalmente, el muestreo se realizó tanto para la inyección de CO_2 puro como para la inyección de la mezcla gaseosa. La bomba mediante la cual extraían las muestras se dañó en agosto de 2013 y durante el verano de 2014, causando 2 intervalos sin recolección de datos. Las fallas en la bomba se debieron a precipitaciones masivas de $CaCO_3$ (incrustaciones) dentro y fuera de la bomba.

La mayoría de los trazadores y constituyentes disueltos en el agua fueron medidos en el primer pozo de monitoreo HN-4 antes, durante y después de la inyección, en 2012, hasta septiembre de 2014. El pH en el agua del primer pozo de monitoreo pasó de 6.5 (una vez disueltos los minerales del basalto) a 9 después de haber finalizado la inyección y una vez que el agua del pozo inyector llego al pozo de monitoreo. El pH se mantuvo bajo durante semanas después de que la inyección finalizó, posteriormente, se elevó lentamente hasta un valor cercano al de la pre-inyección (6.6) y después volvió a caer de una manera similar durante la inyección de la mezcla de gas. Las concentraciones de Mg^{2+}, Ca^{2+} y Fe^{2+} incrementaron una vez que el pH disminuyó y después declinaron hasta un valor similar al de la pre-inyección después de que la inyección se detuvo.[33]

El monitoreo superficial encargado de detectar CO_2 en la atmósfera no indicó ninguna fuga de gas durante la duración del proyecto, el flujo de CO_2 en el subsuelo fue llevado a cabo de acuerdo al plan de monitoreo que fue actualizado durante la inyección sólo de CO_2, entre enero y marzo de 2012.

Para el análisis de las interacciones roca-fluido, los estudios de reactividad mostraron que los cationes divalentes son liberados durante la interacción entre el basalto y soluciones de CO_2, dando lugar al primer paso para la carbonización. A menor pH el Fe^{2+} y el Mg^{2+} se liberan de manera más rápida que el Ca^{2+}, sugiriendo que los carbonatos de Fe^{2+} y Mg^{2+} forman las etapas iniciales de carbonización. La caracterización de los basaltos después de su reacción mostró que la superficie de las rocas se vuelve más pobre en cationes divalentes. Los resultados también mostraron que la disolución de los minerales basálticos diópsidos[I] no es afectada por un revestimiento superficial de calcita. Sin embargo, los experimentos con forsterita mostraron que su interacción con CO_2 puede llevar a la formación de una capa pasivante[II], por lo menos a altas presiones y temperaturas.

Experimentos a altas presiones, de flujo a través de una columna reactiva, mostraron que la interacción inicial entre el basalto y el CO_2 con agua liberaron sólo 4 elementos en concentraciones por encima del límite del agua potable (aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn) y cromo (Cr)). En su estado trivalente (3+), estos elementos forman óxidos insolubles e hidróxidos bajo circunstancias de pH neutro, sugiriendo que su concentración se reducirá significativamente después de que se añada materia orgánica para amortiguar el pH resultante de la disolución de basaltos.

En cuanto a la precipitación de carbonatos, los rangos de precipitación de la magnesita ($MgCO_3$), medidos entre 100 y 200°C, incrementan con el estado de saturación pero disminuyen con el incremento de actividad del CO_3^{2-} y el incremento del pH. Una comparación entre rangos de precipitación de la magnesita y de forsterita (Mg_2SiO_4) sugiere que los rangos relativamente bajos de precipitación de la magnesita podrían ser el paso limitante en los esfuerzos de la carbonatación mineral en rocas ultra-máficas.

El comienzo de la nucleación[III] de la calcita y la cantidad de calcita precipitada depende de las características del sustrato (sustancia o capa que subyace sobre una superficie o sobre la cual ocurre algún proceso). En todos los casos, la precipitación de la calcita ocurre solamente en el sustrato del mineral. Los resultados indicaron que la nucleación de la calcita y su crecimiento dependen de la estructura cristalina del silicato que constituye al basalto original. La implicación para la mineralización de CO_2 en rocas basálticas es que la nucleación de los carbonatos es más factible en rocas cristalinas, pero también se pueden formar en superficies vítreas.

El envejecimiento de calcita sintética se llevó a cabo a un máximo de 200 °C y 14.8 atm de presión y resultó en un aumento del tamaño del grano en 10 veces, para disminuir la energía superficial libre. El grosor de la carbonatación mineral puede mover material a nuevos sitios y agrandar cristales, que probablemente fracturen el área superficial favoreciendo futuras reacciones.

Cabe destacar que los compuestos orgánicos complejos, los cuales pudieron ser arrastrados hacia la formación porosa desde la superficie o bien, pudieron ser producidos por actividad microbiana durante la inyección de CO_2 pueden tener una gran influencia en el crecimiento de $CaCO_3$. Carbonatos ferrosos como la siderita ($FeCO_3$) tienen preferencia a formarse durante el secuestro de CO_2.

[I] Es un mineral piroxeno monoclínico, se presenta en rocas magmáticas, mármoles y rocas de silicato cálcico. Su fórmula química es $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$.[47]

[II] El término pasivante se refiere al proceso químico y físico mediante el cual un material se ve menos afectado por corrosión debido al ambiente en el que se encuentra. El proceso involucra la creación de una capa exterior que actúa como escudo para el material, se crea con una reacción química con el material base.[48]

[III] La nucleación es el proceso en el que ocurre la formación de un cristal a partir de una solución, solución en la que un pequeño número de iones, átomos o moléculas pasan a tener un arreglo ordenado, característica de los sólidos cristalinos.[49]

Las velocidades de liberación de elementos en estado estable, de la disolución de basaltos, fueron medidas en un intervalo de pH de 2 a 11 y temperaturas de 5 a 75 °C, en reactores de flujo mixtos. Las velocidades de liberación de Si^{4+} y Ca^{2+} aumentan tanto en condiciones ácidas como básicas. En contraste, el Mg^{2+} y Fe^{2+} que se liberan con mayor velocidad a pH ácidos y dicha liberación disminuye de manera continua conforme se incrementa el pH, independientemente de la temperatura.

En paralelo, experimentos para determinar los cambios químicos a largo plazo (1.5 años) en basaltos a través de la interacción con CO_2 (al 5%), realizados con espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS), mostraron una reducción en la superficie de la roca de Na, Fe, Ca y Mg.

Para probar la reactividad por efecto de la precipitación de carbonatos en la roca madre, se midieron las tazas de disolución de diópsidos ($MgCaSi_2O_6$) en soluciones básicas y neutras a 25 y 70 °C por 164 días. En las soluciones supersaturadas a 25 °C la calcita se formó de manera extensiva en la superficie de los diópsidos, mientras que en las soluciones bajosaturadas no se formaron precipitaciones.

La forsterita es abundante en rocas máficas y ultramáficas, su rango de disolución es relativamente alto y se espera que se transforme en minerales carbonatados de manera rápida durante el proceso de carbonatación con tazas limitadas por la precipitación de magnesita. Durante la exposición a agua pura (des–ionizada) y CO_2 a condiciones superiores a las supercríticas (120 °C y 78.94 atm), la forsterita fue transformada en su mayoría en magnesita, en un periodo de entre 6 y 8 días.

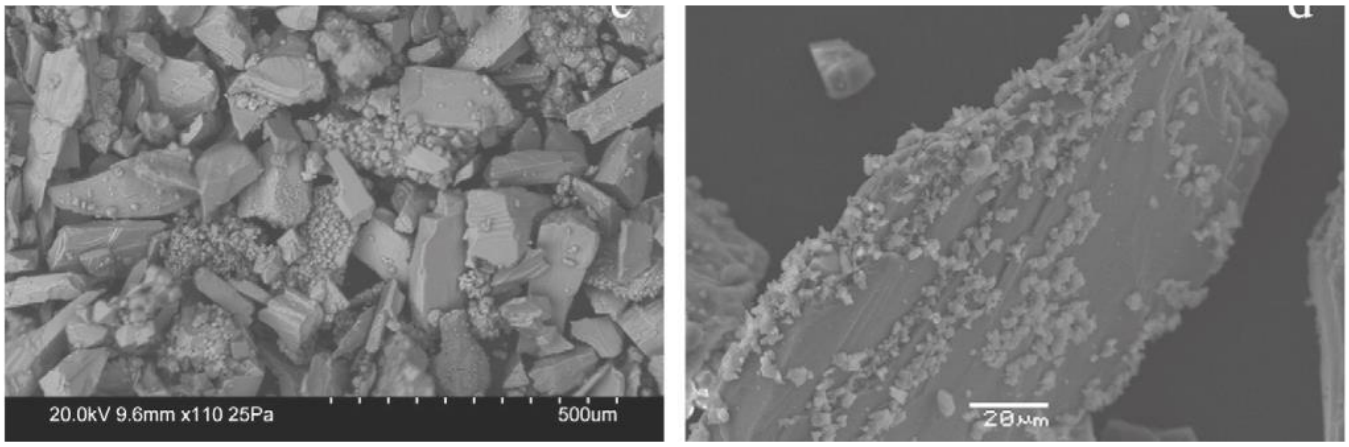


Figura 16.- Imágenes de microscopía electrónica de diópsidos aplastados con la precipitación secundaria de calcita.[33]

Normalmente, la disolución de minerales depende del pH, la inyección de CO_2 disuelto en agua debería resultar en una disolución extensiva de la roca, pero dependiendo de la composición de la roca, algunos elementos liberados pueden ser tóxicos. A través de algunos experimentos de laboratorio se determinó que algunos iones como el Sr^{2+}, Fe^{2+}, Al^{3+}, Ca^{2+}, Ba^{2+}, Mn^{2+} y Mg^{2+} son liberados, pero la mayoría al combinarse con CO_2 tienden a formar carbonatos minerales a excepción del Al. En la práctica, la tasa de disolución fue hasta 4 órdenes de magnitud menor y reflejó la ausencia del mezclado y altas concentraciones de Si en las pruebas de laboratorio, por lo que la liberación de elementos contaminantes en agua potable fue generalmente baja, pero los niveles de concentración para Al^{3+}, Cd^{2+}, Mn^{2+}, y especialmente As^{3+}, excedieron los valores recomendados por WHO (World Health Organization).

Durante las primeras etapas del experimento, cuando el pH era más alto, la composición de la solución era consistente con la formación de un rango de fases secundarias, conocidas por captar elementos traza. Conforme el pH disminuía, algunas de las fases secundarias se disolvían, generando un aumento retrasado de elementos tóxicos.

Aunque estos elementos, en su mayoría son metales, son liberados durante el almacenamiento de CO_2 en basaltos, se considera que es altamente probable que los carbonatos secundarios secuestren cantidades significativas de estos metales, reduciendo la cantidad real de metales libres en el agua.

A partir de los datos obtenidos durante el proyecto se creó una base termodinámica y cinética que describe la interacción entre el CO_2, el agua y las rocas de la formación durante el proceso de almacenamiento. Para la elaboración de esta base de datos se utilizaron los resultados obtenidos de la interacción de agua-CO_2-basaltos, además de las tazas de disolución de 110 rocas comunes que forman minerales, en función de la temperatura y composición del fluido.[33]

La base de datos cinética fue establecida a través de una revisión de datos existentes en la literatura acerca de precipitación y tasas de disolución, la mayoría se pueden ajustar a la siguiente ecuación:

$$r = A_A(-\frac{E_A}{RT})\sum a_i(1 - exp\left(-\frac{A}{RT}\right)\cdots\cdots\cdots(8)$$

Donde:
r significa rango de disolución en estado estable.
A_A se refiere al factor pre-exponencial.
E_A designa la energía de activación.
R representa la constante de los gases.
T se refiere a la temperatura absoluta.
A se refiere a la afinidad química de la fase disolvente.

Tabla 7.- Composición química de los minerales de mayor interés contenidos en la base datos termodinámica desarrollada para el proyecto CarbFix.[33]

GRUPO	MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA
ESPECIES ACUOSAS	$Al(OH)_3$	$Al(OH)_3$
	$Al(OH)_2^+$	$Al(OH)_2^+$
	$Al(OH)^{2+}$	$Al(OH)^{2+}$
	Al^{3+}	Al^{3+}
MINERALES Y VIDRIOS PRIMARIOS	Vidrio Basáltico	$Al_{0.36}Fe(II)_{0.19}Mg_{0.28}Ca_{0.26}Na_{0.08}SiO_{3.31}$
	Plagioclasas	$Ca_{0.70}Na_{0.30}Al_{1.70}Si_{2.3}O_8$
	Piroxenos	$Ca_{0.35}Mg_{0.42}Fe_{0.23}SiO_3$
	Olivinos	$(Mg_{0.80}Fe_{0.20})_2SiO_3$
SILICATOS	Allofanita	$Al_2O_3(SiO_2)_{1.22}(H_2O)_{2.5}$
	Dióxido de silicio amorfo	SiO_2
	Antigorita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
	Ca-Montmorillonita	$Ca_{0.167}Al_{1.67}Mg_{0.33}Si_4O_{10}(OH)_2$
	Celadonita	$KMgAlSi_4O_{10}(OH)_2$
	Fe-Celadonita	$KFeAlSi_4O_{10}(OH)_2$
	Fe-Clorita	$Fe_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$
	Imogolita	$Al_2SiO_3(OH)_4$
	Kaolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	K-Montmorillonita	$K_{0.33}Al_{1.67}Mg_{0.33}Si_4O_{10}(OH)_2$
	Mg-Clorita	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$
	Mg-Montmorillonita	$Al_{1.67}Mg_{0.5}Si_4O_{10}(OH)_2$
	Moganita	SiO_2
	Na-Montmorillonita	$Na_{0.33}Al_{1.67}Mg_{0.33}Si_4O_{10}(OH)_2$
	Cuarzo	SiO_2
HIDRÓXIDOS	Al amorfo	$Al(OH)_3$
	Hidróxido Fe (II)	$Fe(OH)_2$
	Hidróxido Fe (III)	$Fe(OH)_3$
CARBONATOS	Calcita	$CaCO_3$
	Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$
	Magnesita	$MgCO_3$
	Siderita	$FeCO_3$
ZEOLITAS	Analcima	$Na_{0.96}Al_{0.96}Si_{2.04}O_6{*}H_2O$
	Ca-Chabazita	$CaAl_2Si_4O_{12}{*}6H_2O$
	Ca-Heulandita	$CaAl_2Si_7O_{18}{*}6H_2O$
	Laumontita	$CaAl_2Si_4O_{12}{*}4.5H_2O$
	Mesolita	$Ca_{0.666}Na_{0.666}Al_2Si_3O_{10}{*}2.667H_2O$
	Na-Chabazita	$Na_2Al_2Si_4O_{12}{*}6H_2O$
	Na-Heulandita	$Na_2Al_2Si_7O_{18}{*}5H_2O$
	Natrolita	$Na_2Al_2Si_3O_{10}{*}2H_2O$
	Stellerita	$Ca_2Al_4Si_{14}O_{36}{*}14H_2O$
	Estilbita	$Ca_2NaAl_5Si_{13}O_{36}{*}16H_2O$

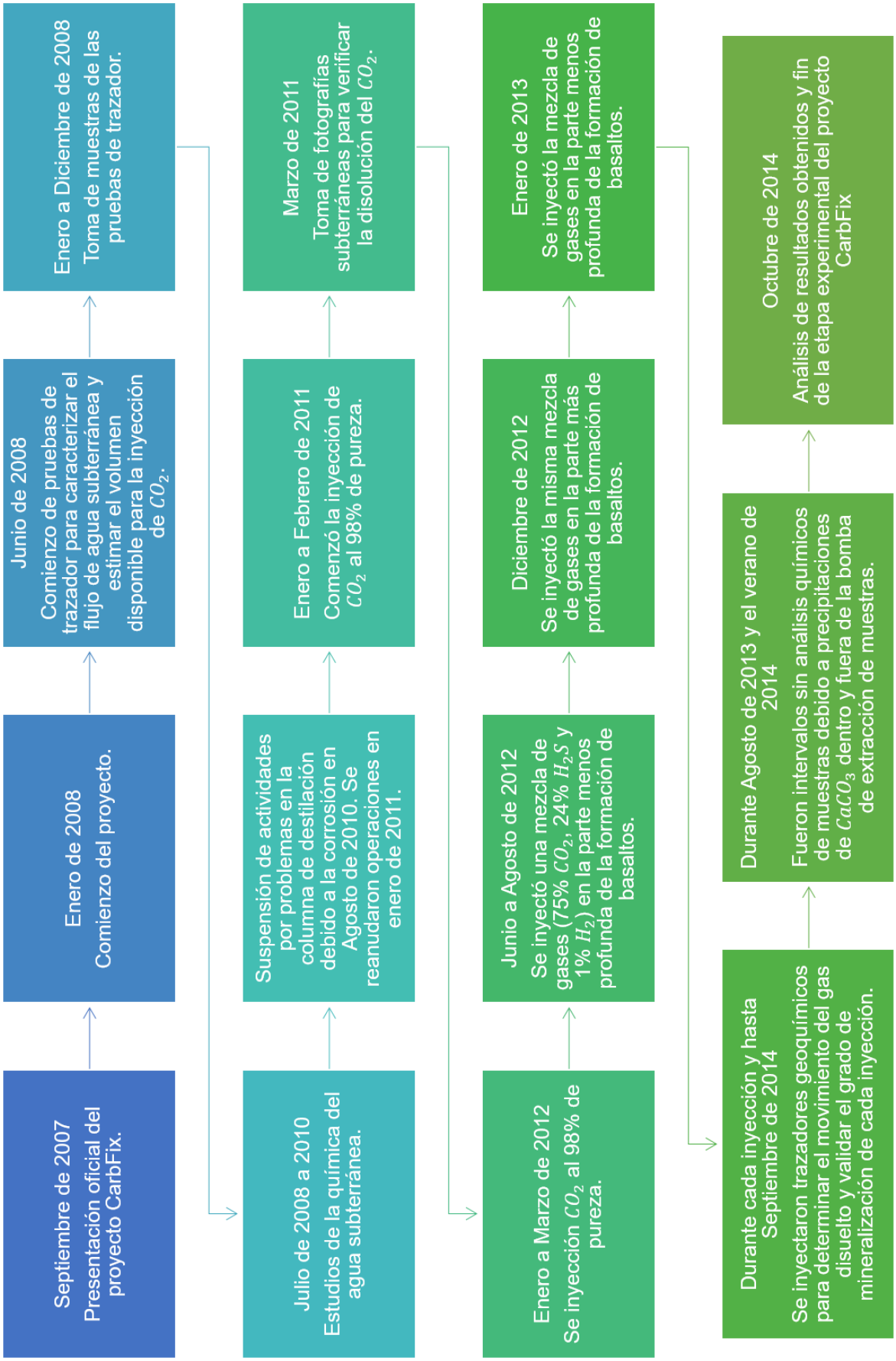


Figura 17.- Línea de tiempo de la etapa experimental del proyecto CarbFix.[33]

4.6. Costos del proyecto CarbFix

Al inicio del proyecto CarbFix, el presupuesto inicial fue de 7,333,262 Euros (€), para un periodo de 3 años. Esta inversión se dividió entre los integrantes del proyecto de la siguiente manera:

OR: Orkuvieta Reykjavíkur 3,304,970 €
IES: Universidad de Islandia, Instituto de Ciencias de la Tierra 2,243,792 €.
LDEO: Universidad de Columbia (EU), Observatorio de la Tierra Lamont–Doherty 1,097,974 €.
CNRS: Centro Nacional de Investigación Científica, Francia 691,526 €.
ISOR: Servicio Geológico de Islandia.

La tasa de cambio de referencia para ese año (2007 septiembre) fue de 0.7 USD/€.

El costo de perforar un pozo del mismo tamaño y tipo que el pozo de inyección HN-02 es de aproximadamente 1.9 millones de Euros, y el costo de perforar un pozo de monitoreo profundo es de aproximadamente 0.3 millones de Euros. El costo Estimado de perforar los 9 pozos de CarbFix es de 6,000,000 €.

La planta piloto de separación que suministra CO_2 al proyecto CarbFix se considera un proyecto separado, por lo que los costos de esta no se ven reflejados dentro de la información financiera del proyecto. El costo estimado de esta fue de 2,500,00 €.

La tabla 8 muestra la información financiera del proyecto del año 2006 al 2011.

Tabla 8.- Información Financiera del proyecto CarbFix del año 2006 al 2011.

	Euros						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Notas
Ingresos							
Contribución de OR	72,109	228,311	1,252,041	405,170	585,832	314,743	
Contribución de IES	87,131	523,333	374,031	238,410	354,257	160,244	1
Contribución de LDEO	52,979	48,114	137,100	214,481	227,682	253,571	2
Contribución de CNRS	17,640	58,604	136,643	297,499	181,625	133,901	
Contribución Total	**229,859**	**857,821**	**1,899,815**	**1,155,559**	**1,349,397**	**862,459**	
Gastos							
Sueldos y Salarios de OR	45,848	114,048	106,685	169,320	168,552	121,805	3
Sueldos y Salarios de IES	49,075	163,180	181,838	208,632	224,396	124,189	
Sueldos y Salarios de LDEO	28,988	37,582	76,097	121,808	110,851	116,585	4
Sueldos y Salarios de CNRS	11,400	41,279	96,375	152,281	106,635	67,607	
Sueldos y Salarios Totales	**135,311**	**356,089**	**460,995**	**652,041**	**610,164**	**430,186**	
Costos de Viaje Internacional OR	0	9,835	1,535	0	2,212	0	
Costos de Viaje Internacional/nacional IES	16,691	34,930	32,698	38,380	42,487	0	

Costos de Viaje Internacional LDEO	8,130	2,298	9,909	12,500	7,928	22,748	
Costos de Viaje Internacional CNRS	2,500	5,020	9,870	30,200	10,400	10,200	
Costos Totales de Viajes	**27,591**	**52,083**	**54,013**	**81,080**	**63,027**	**32,948**	
Costos operacionales y de equipos OR	26,261	97,776	266,288	425,401	58,111	154,853	5
Costos operacionales y de equipos IES	20,010	82,961	195,014	87,367	52,909	0	6
Costos operacionales y de equipos LDEO	12,489	1,958	33,211	52,791	40,506	28,140	7
Costos operacionales y de equipos CNRS	500	1,100	5,300	60,375	31,500	31,500	8
Costo total de operaciones y equipos	**59,261**	**183,794**	**499,813**	**625,934**	**183,026**	**214,494**	
Página Web y Marketing OR	0	7,741	3,626	11,538	1,018	1,889	9
Página Web y conferencias IES	0	0	0	38,720	112	0	10
Costo total de la página web, marketing y conferencias	**0**	**7,741**	**3,626**	**-**	**1,130**	**1,889**	
Costo indirecto de recuperación OR	0	0	0	0	34,497	47,211	
Costo indirecto de recuperación IES	15,884	54,626	64,980	74,038	69,458	36,055	
Costo de recuperación (15%) LDEO	3,371	6,279	17,883	27,382	68,398	86,099	
Costo indirecto de recuperación CNRS	3,240	10,665	25,098	54,643	33,360	24,594	11
Otros Costos de Operación	**22,495**	**71,566**	**107,960**	**156,062**	**205,712**	**193,959**	
Costos Operacionales totales OR	72,109	229,400	378,134	606,259	264,390	325,759	
Costos Operacionales totales IES	101,930	335,697	474,530	447,137	389,362	160,244	2
Costos Operacionales totales LDEO	52,979	48,114	137,100	214,481	227,682	253,571	2
Costos Operacionales totales CNRS	17,640	58,064	136,643	297,499	181,625	133,901	
Costo Total de Operación	**244,658**	**671,275**	**1,126,407**	**1,565,375**	**1,063,059**	**873,476**	
Ganancia/Pérdida							
Ganancia/Pérdida OR	0	-1,090	873,907	-201,090	321,443	0	
Ganancia/Pérdida IES	-14,799	187,636	-100,499	-208,727	-34,993	0	
Ganancia/Pérdida LDEO	0	0	0	0	0	0	
Ganancia/Pérdida CNRS	0	0	0	0	0	0	

Ganancia/Pérdida Total	**-14,799**	**186,546**	**773,408**	**-409,816**	**286,499**	**0**	
Balance							
Balance del año previo OR	-	0	-1,090	872,817	671,727	993,170	12
Balance del año previo IES	-	-14,799	172,837	72,338	-136,389	-171,382	
Balance del año previo LDEO	-	0	0	0	0	0	
Balance del año previo CNRS	-	0	0	0	0	0	
Balance total del año anterior	**-**	**-14,799**	**171,747**	**945,155**	**535,339**	**821,788**	

Notas:
1- IES contribuyó más de lo previsto al proyecto CarbFix en 2009.
2- IES y LDEO contribuyeron más de lo estimado al proyecto CarbFix en 2010.
3- Salarios: Director de proyecto, investigadores, abogados y técnicos.
4- Incluye el salario, pagos para el personal y beneficios adicionales (30.8%).
5- Suministros: configuración de los pozos, bombas subterráneas, motores de diésel, contenedores, conexiones a la red eléctrica, petróleo y electricidad en el lugar, equipo de muestreo, maquinaria pesada, trabajo de campo de ISOR, análisis y costos de diseño y construcción del sistema de inyección.
6, 7,8- Laboratorios, suministros y análisis.
9- Costo del diseño de la página web de CarbFix y el logo.
10- IES costo de la conferencia internacional en Captura y almacenamiento de CO_2 en Hellisheidi en 2009.
11- Costos generales.
12- La inyección de CO_2 estaba planeada para el otoño de 2008, pero fue retrasada hasta 2011. Por lo tanto el costo estimado de diseño se refleja en 2009 y 2010, mientras que el costo de ejecución y monitoreo se refleja en 2010 y 2011.

En cuanto a la tasa de cambio promedio utilizada, se tienen los siguientes valores:

En 2006 0.7970 USD/EUR.
En 2007 0.7308 USD/EUR.
En 2008 0.6834 USD/EUR.
En 2009 0.7192 USD/EUR.
En 2010 0.7546 USD/EUR.
De enero a marzo de 2011 0.7439 USD/EUR.

Donde:
EUR (Euro)
USD (Dólar de Estados Unidos)

4.7. Conclusiones del proyecto CarbFix

Una vez concluidas las pruebas, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Las simulaciones predijeron que la calcita se encuentra entre los carbonatos más abundantes a formarse en Hellisheidi a profundidades intermedias, mientras que la magnesita predomina en sistemas más profundos.

- Simulaciones de la planta piloto de inyección de 1,200 ton predijeron que 85% del CO_2 inyectado se mineralizaría en un plazo de 5 años, y el 100% a 10 años. Estos resultados coincidieron con los resultados del monitoreo, que indicó aproximadamente un 80% de mineralización un año después de la inyección.

- Simulaciones a escala mayor (400,000 ton inyectadas de CO_2) durante 10 años predicen una captura mineral de un 80% después de un plazo de 100 años, lo que indica que la inyección de CO_2 en basaltos a nivel industrial será una opción viable en la reducción de emisiones de CO_2 de origen antropogénico, debido al gran potencial de almacenamiento y la gran velocidad de mineralización del método.

- Escenarios simulados de secuestro de CO_2 en yacimientos profundos demostraron un proceso rápido, y los proyectos piloto de inyección demostraron que la mineralización sucede en un plazo de un año, además se demostró que a mayor profundidad y mayores temperaturas la mineralización es más rápida.

- En comparación con otros tipos de almacenamiento, los modelos numéricos indicaron que la opción más viable para reducir las emisiones de CO_2 antropogénico era su inyección en basaltos, ya que garantiza su almacenamiento permanente en unos cuantos años, comparado con el almacenamiento de CO_2 supercrítico, el cual toma entre 100 y 10,000 años.

Para escenarios de simulación de inyección de CO_2 con impurezas, principalmente H_2S, se observó que las formaciones basálticas son buenas para almacenar ambos gases. Mientras que en el escenario de la planta piloto, se observó que 85% del H_2S inyectado fue mineralizado en un lapso aproximado de 1 año, mientras que el 100% en 5 años. El CO_2 inyectado en esta prueba se espera que sea mineralizado en su totalidad en un lapso de 1 año.[33]

Se han demostrado las siguientes ventajas del método de almacenamiento CarbFix:

1) La transformación de basaltos mediante la inyección de CO_2 disuelto en agua, en carbonatos estables se llevan a cabo en una escala de tiempo bastante corta con respecto a otros métodos (12 meses a 5 años) ya que la solubilidad del basalto es casi inmediata en presencia del CO_2 bajo las condiciones evaluadas.

2) En el almacenamiento geológico tradicional se tiene una fase del gas inyectado que tiene preferencia a permanecer boyante por cientos de años y por consecuencia existe un riesgo de fuga hacia la superficie. En contraste el método de CarbFix disuelve CO_2 en agua, dando como resultado un fluido más denso, por lo que el gas es llevado al fondo de la unidad porosa, disminuyendo la posibilidad de escape.

3) Las rocas basálticas reaccionan de manera rápida debido a la acidez del fluido inyectado, produciendo la mineralización de los elementos disueltos, así como limitando el transporte de metales tóxicos asociados con los fluidos ácidos en los poros.

4) Los minerales carbonatados son estables por millones de años o más. Una vez transformado el CO_2 en minerales el monitoreo en el sitio ya no es necesario, aunque debido a la liberación de algunos metales se deberían tomar muestras del agua subterránea, para corroborar que no exista alguna fuga o filtración de éstos.

5) Los costos derivados de este método pueden ser mayores al inicio, pero disminuyen a largo plazo ya que se ahorra la inversión en monitoreo que utilizan otros métodos de almacenamiento geológico.

6) Si bien se ha demostrado el éxito de almacenar CO_2 en rocas basálticas, los proyectos del mismo tipo no se han desarrollado a gran escala debido a que las rocas basálticas (rocas ígneas) no son tan comunes en los continentes como las rocas sedimentarias, sin embargo, es probable que en el futuro los proyectos de almacenamiento geológico de este tipo se desarrollen costa fuera[I] debido a dos causas, la primera, existe una gran cantidad de roca ígnea, y la segunda, en muchos países (Sobre todo en Europa) la opinión pública está en contra del almacenamiento geológico en tierra.

7) Rocas basálticas se encuentran comúnmente de manera adyacente a los continentes y tienen una enorme capacidad de almacenamiento, además de que el lecho marino también está compuesto de rocas basálticas.

8) El proyecto CarbFix es bastante versátil y no está limitado a la industria energética. La tecnología empleada para captura/separación de gas es independiente de la fuente de éste, la planta de captura/separación puede ser adoptada por industrias de diferentes tipos en todo el mundo.

9) El método CarbFix puede ser aplicado fácilmente si se cuenta con una fuente de agua (para poder disolver el CO_2), incluida agua de mar, la cual debe localizarse cerca del lugar de inyección. Además de que el método puede funcionar con otros gases industriales dañinos para la salud o el medio ambiente, tales como el H_2S[II] o los gases emitidos en la industria geotérmica.

[I] En contraste a los continentes, el fondo marino está principalmente compuesto de rocas basálticas. Sólo una pequeña fracción de las rocas submarinas son consolidadas como rocas sedimentarias.

[II] Además del proyecto CarbFix también existe el proyecto “SulFix”, que se llevó a cabo en paralelo al proyecto CarbFix, a diferencia del método CarbFix, el método SulFix se encarga de inyectar H_2S disuelto en agua en basaltos, mineralizando así el H_2S y almacenándolo de manera permanente.

5. Toma y análisis de muestras

Tomando como referencia el trabajo realizado en el proyecto CarbFix, se investigaron lugares con propiedades similares, en donde se pudieran realizar pruebas de inyección de CO_2 disuelto en agua. El fin de este trabajo es estudiar la factibilidad de almacenar CO_2 en rocas basálticas, con el fin de reducir sus emisiones y así su contribución al calentamiento global. De manera inicial se buscaron puntos donde se pudieran conseguir muestras de basalto, y de esta manera caracterizarlos para posteriormente realizarles pruebas de inyección en laboratorio. Los aspectos tomados en cuenta para seleccionar el área donde se recolectaron las muestras fueron los siguientes:

- Localización de basaltos cercanos a fuentes de gran aporte de CO_2, principalmente, plantas generadoras de electricidad.
- Idealmente se buscaron zonas de basaltos con propiedades básicas (máficas).
- Caminos accesibles mediante vehículo o no de tan difícil acceso a pie, esto debido a que no se contaba con equipo necesario para adentrarse en zonas muy alejadas o difíciles y el equipo de recolección era muy pequeño, por lo que cargar con grandes volúmenes de roca sería complicado.

Para seleccionar el lugar adecuado se utilizaron 2 documentos, el primero fue el Mapa de la Ruta Tecnológica de CCUS en México (ver figura 9). Este mapa se utilizó con el fin de localizar las áreas con mayor aporte de gases de efecto invernadero, en especial CO_2. Para este trabajo se tuvo interés especial en plantas de generación eléctrica, pero también son tomados en cuenta puntos de la industria del cemento y cal, así como algunos puntos de la industria del gas, el petróleo y petroquímica.

Como segunda referencia se analizó el documento “Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana”, donde se buscaron las zonas del país con mayor contenido en rocas basálticas cercanas a los puntos anteriormente mencionados. El mapa utilizado puede verse en la figura 18.

Para la toma de muestras se tomaron en cuenta 3 tipos de basaltos, el primero es el de “Volcanismo máfico a intermedio del Plioceno Tardío-Cuaternario (<3Ma), el segundo es el “Arco Volcánico andesitico del Mioceno (~19 - 10 Ma) y “Volcanismo silícico del Plioceno (~5 – 1.8 Ma). Las 3 formaciones se encuentran distribuidas entre el estado de Tlaxcala, Puebla e Hidalgo.

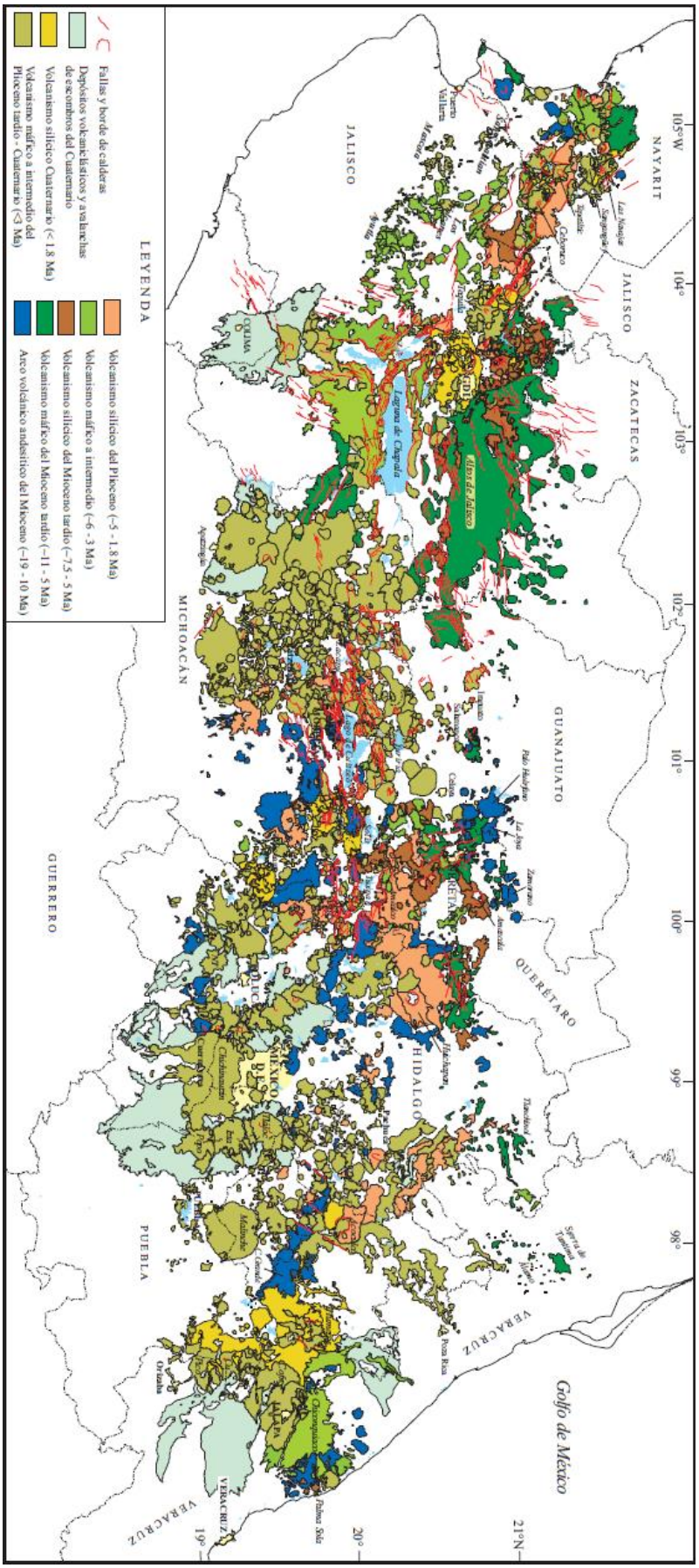


Figura 18.- Mapa geológico simplificado de la faja volcánica Transmexicana.[37]

Se estima que, para estudios futuros, sobre la captura de CO_2 proveniente de zonas petroleras las formaciones con mejores características para ser estudiados son las de “Volcanismo Máfico intermedio (~6 – 3 Ma) y “Volcanismo Silícico Cuaternario (<3 Ma), localizadas principalmente en Veracruz.

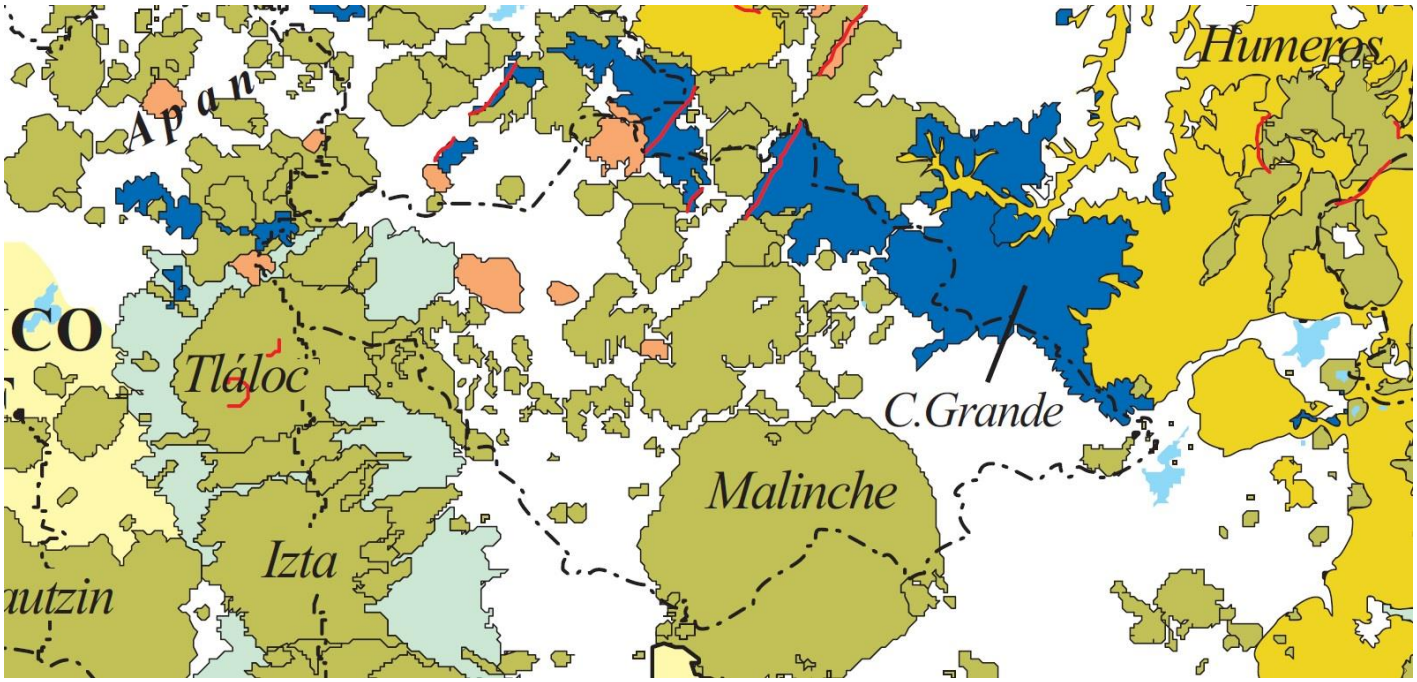


Figura 19.- Mapa geológico simplificado de la faja volcánica Transmexicana, zona de interés para la recolección de muestras.[37]

La figura 19 muestra un acercamiento mayor a la zona donde se llevó a cabo la recolección de muestras.

En total se recolectaron 7 muestras de 7 puntos distintos, abarcando sólo 2 formaciones, la de Volcanismo máfico a intermedio del Plioceno Tardío-Cuaternario y la del Arco Volcánico andesítico del Mioceno.

Muestra 1.- Se colectó en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°13’36.3”W, Latitud: 19°25’54.0”N y coordenadas decimales Latitud: 19.431679 y Longitud: -98.226744. De acuerdo a su clasificación petrológica se considera un basalto básico, con aproximadamente 46–52 % de SiO_2. El tipo de volcanismo mediante el cual se formó la roca fue máfico a intermedio, del Plioceno tardío- Cuaternario (<3 Ma). La muestra se tomó en el centro del cauce de un arroyo, y muestra una alteración mineral importante, así como presencia de minerales carbonatados como calcita.

Muestra 2.- Se tomó en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°13'12.6"W, Latitud: 19°27'30.4"N y coordenadas decimales Longitud: -98.220157 y Latitud: 19.458436. Se trata de igual manera de un basalto básico con una composición similar del 46 - 52 % de SiO_2. Las similitudes en las propiedades de la muestra anterior se debe a que se encuentran en la misma formación de Volcanismo máfico a intermedio del Plioceno tardío – Cuaternario. La muestra se tomó en el margen derecho de un arroyo cercano a un puente, muestra alteración mineral.



Figura 20.- Arroyo donde se recolecto la primer muestra de basalto.

Muestra 3.- Se colectó en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°06'54.2"W, Latitud: 19°38'15.2"N y las coordenadas decimales tienen una Longitud: -98.115055 y Latitud: 19.63757. Tiene las mismas características de un basalto básico con una composición del 46–52 % de SiO_2, formado en un tipo de Volcanismo máfico a intermedio del Plioceno tardío–Cuaternario. La muestra se obtuvo de un afloramiento del lado norte de la carretera Tlaxco-Zacatlán, no presenta alteración mineral importante (muestra de roca sana).

Muestra 4.- Se obtuvo en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°05'40.6"W, Latitud: 19°40'20.2"N y las coordenadas decimales tienen una Longitud: -98.094624 y Latitud: 19.672275. De acuerdo al documento Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana se trata de una roca con clasificación Andesita-Dacita que van de intermedias a ácidas, con un contenido incluso mayor a 63% de SiO_2. El tipo de volcanismo que presenta es del arco volcánico andesitico del mioceno (~19 – 10Ma). La muestra se recolectó en bloques de roca presentes al lado norte de la carretera Tlaxco-Zacatlán, presenta fracturas y una alteración mineral importante (muestra de roca alterada), presencia de óxidos de Fe-Mg.

Muestra 5.- Se obtuvo en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°05'13.8"W, Latitud: 19°41'24.4"N y las coordenadas decimales tienen una Longitud: -98.087166 y Latitud: 19.690107. La muestra tiene la misma clasificación de Andesita-Dacita, de intermedias a ácidas, con contenido mayor a 63% de SiO_2. Presenta el mismo tipo de volcanismo que la muestra 4. La muestra se recolectó en bloques rodados en la falda de una colina al lado sur de la carretera Tlaxco-Zacatlán, presenta alteración mineral en la cubierta exterior, presencia de óxidos de Fe-Mg.

Muestra 6.- Se obtuvo en las mismas coordenadas que la muestra 5, por lo que tiene la misma clasificación petrológica y el mismo tipo de volcanismo. La muestra se recolectó a unos metros de la muestra 5, por lo que se espera que tenga características muy similares, de igual forma presenta alteración mineral en la cubierta exterior y presencia de óxidos de Fe-Mg.



Figura 21.- Lugar donde se tomaron las muestras 5 y 6.

Muestra 7.- Se obtuvo en las coordenadas Hexadecimales con Longitud: 98°03'44.2"W, Latitud: 19°42'24.9"N y las coordenadas decimales tienen una Longitud: -98.062285 y Latitud: 19.706914. De acuerdo al documento Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana se trata de rocas con clasificación Andesitas intermedias, con un contenido entre 52 y 63% de SiO_2. De igual manera pertenece al arco volcánico andesitico del Mioceno (~19 – 10Ma). La muestra se recolectó en la margen derecha de un arroyo al interior del bosque, fue la muestra que presentó mayor dureza al momento de ser colectada.

Cabe mencionar que todas las muestras fueron obtenidas en superficie, algunas picando dentro de la zona de basaltos para obtener muestras lo más frescas y limpias posible, pero en algunos casos debido a la dificultad de encontrar una muestra lo suficientemente grande o representativa, se consiguieron muestras que presentaban erosión o intemperización.

Tabla 9.- Resumen de las propiedades de los basaltos y mapa de su lugar de recolección, de Tlax01 a Tlax03.

Muestra	Tipo de Volcanismo	% SiO2	Clasificación Química	Clasificación Petrológica	Coordenadas Hexadecimales		Mapa
					Latitud	Longitud	
Tlax-01	Máfico a intermedio del Plioceno Tardío-Cuaternario (<3 Ma)	46-52	Básica	Basalto	19°25'54.0"N	98°13'36.3"W	
Tlax-02	Máfico a intermedio del Plioceno Tardío-Cuaternario (<3 Ma)	46-52	Básica	Basalto	19°27'30.4"N	98°13'12.6"W	
Tlax-03	Arco volcánico andesítico del Mioceno (~19-10 Ma)	46-52	Básica	Basalto	19°38'15.2"N	98°06'54.2"W	

Tabla 10.- Resumen de las propiedades de los basaltos y mapa de su lugar de recolección, de Tlax04 a Tlax07.

Muestra	Tipo de Volcanismo	% SiO_2	Clasificación Química	Clasificación Petrográfica	Coordenadas Hexadecimales		
					Latitud	Longitud	
Tlax-04	Arco volcánico andesítico del Mioceno (~19-10 Ma	>63	Intermedia-Ácida	Andesita-Dacita	19°40'20.2"N	98°05'40.6"W	
Tlax-05	Arco volcánico andesítico del Mioceno (~19-10 Ma	>63	Intermedia-Ácida	Andesita-Dacita	19°41'24.4"N	98°05'13.8"W	
Tlax-06	Arco volcánico andesítico del Mioceno (~19-10 Ma	>63	Intermedia-Ácida	Andesita-Dacita	19°41'24.4"N	98°05'13.8"W	
Tlax-07	Arco volcánico andesítico del Mioceno (~19-10 Ma	52-63	Intermedia	Andesita	19°42'24.9"N	98°03'44.2"W	

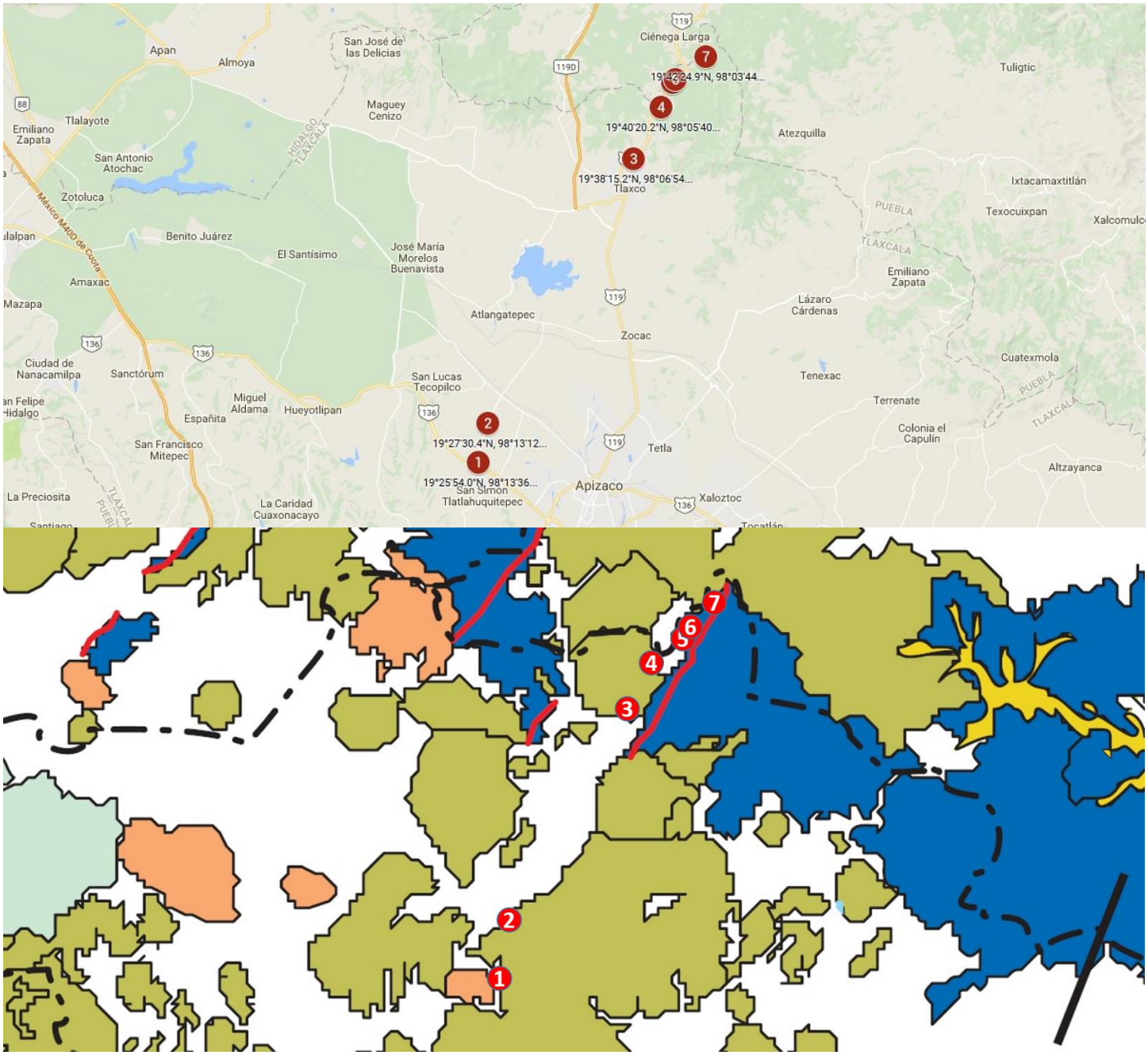


Figura 22.- Localización de los puntos de recolección de basaltos en el mapa de la faja volcánica Transmexicana.

5.1. Análisis de Muestras Recolectadas.

Posterior a la recolección de las muestras se programó una serie de pruebas y análisis para cada una de las muestras:

1. Generación de láminas delgadas para cada una de las muestras.
2. Análisis petrográfico empleando un microscopio petrográfico.
3. Identificación de fases cristalinas contenidas en las muestras de basalto a partir de pruebas de difracción de rayos-X de polvos.
4. Determinación de Fluorescencia de rayos-X para conocer el contenido en porcentaje de los minerales (óxidos) presentes en las muestras.

5. Experimentos de disolución de CO_2 en agua en presencia de muestras de basalto y evaluación del comportamiento de la roca, así como evaluar las propiedades del agua antes y después del experimento.
6. Determinación de la microporosidad y del área superficial de las muestras colectadas.
7. Diseño de las condiciones experimentales para evaluar la interacción CO_2-agua-basalto a temperaturas y presiones elevadas (Determinación de integridad mecánica de celda).

Para el análisis y estudio de cada muestra, sólo se tomarán en cuenta Tlax-03 y Tlax-05, ya que se consideran las muestras con mayor potencial para llevar a cabo la mineralización del CO_2. El análisis de las muestras restantes puede consultarse en el Apéndice A.

5.1.1. Láminas Delgadas y Análisis Petrográfico.

Algunos objetivos de las láminas delgadas es la preparación de rocas, minerales, cerámicas y muestras biológicas para clasificar rocas, identificación y seguimiento de minerales, análisis de elementos mayores o trazables, estudio de texturas o composición, estudiar inclusiones de fluido, estudiar micro fósiles, estudiar discontinuidades en la roca como porosidad o permeabilidad, entre otros.

Existen 4 grupos en los que se dividen los tipos de muestras:

- Láminas delgadas (30 μm) utilizan un cristal de recubrimiento y se utilizan para examen en microscopios, sonda óptica o electrónica.
- Láminas delgadas pulidas, utilizadas para examen en microscopio o sondas de luz transmitida o reflejada o electrónica.
- Láminas delgadas (~ 100μm), para examen en microscopio o sonda con luz reflejada o electrónico.
- Bloques/embuticiones, para examen en microscopio o sonda con luz reflejada o electrónica.

Para obtener láminas delgadas se debe tomar una muestra y cortarla, posteriormente, someter la muestra a un esmerilado o lapeado hasta obtener una planitud completa, realizar el esmerilado de la placa de vidrio hasta obtener una superficie plana, con un grosor bien definido, pegar la muestra al vidrio mediante la impregnación al vacío, cortar el material excedente de la muestra a un grosor de 0.5 – 2 mm, esmerilar o lapear la lámina delgada hasta un grosor final de sección más resina de 30 μm y por último pulir las láminas delgadas eliminando aproximadamente 10 μm.[38]

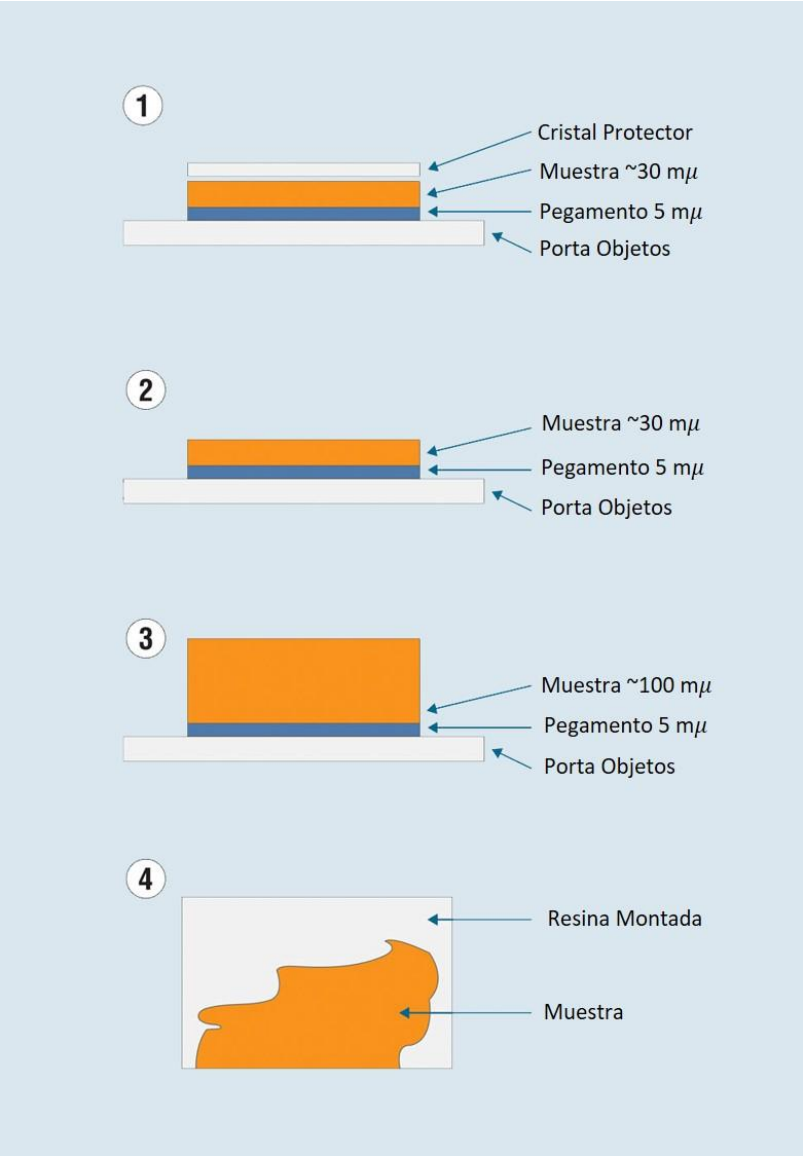


Figura 23.- Imagen de los diferentes tipos de lámina delgada que se pueden crear.[38]

Para su análisis, se crearon láminas delgadas del tipo 1. Se obtuvieron dos láminas delgadas por cada muestra, excepto de Tlax-02 debido a que la muestra tomada tenía evidencias de intemperización, los códigos de las láminas son:

- Tlax01 – Tlax01'
- Tlax03 – Tlax03'
- Tlax04 – Tlax04'
- Tlax05 – Tlax05'
- Tlax06 – Tlax06'
- Tlax07 – Tlax07'

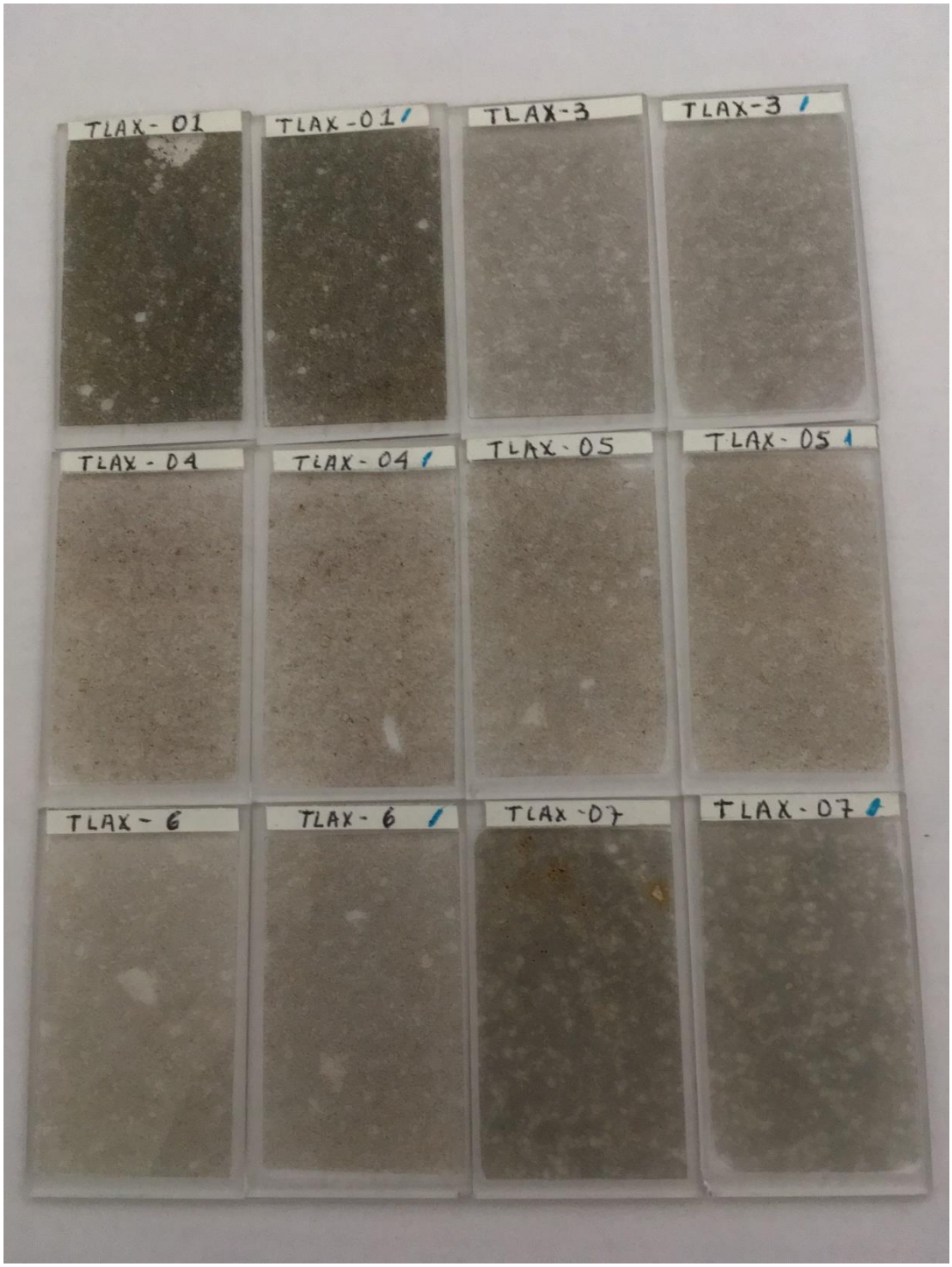


Figura 24.- Fotografía de las láminas delgadas adquiridas para cada muestra de basalto.

Una vez adquiridas todas las láminas se realizó un análisis petrográfico de éstas con ayuda de un microscopio óptico.

A continuación, se muestran algunas partes representativas de cada lámina junto con su análisis petrográfico. Se realizaron los análisis con nicoles cruzados y nicoles paralelos para poder analizar más a fondo la petrografía.

5.1.1.1. Análisis Petrográfico de Tlax-03.

- Textura: Porfídica graduada o seriada.
- Matriz: De plagioclasas euedrales a subedrales.

La roca cuenta con cristales subedrales de olivino[I] con alteración incipiente de iddingsita, cristales subedrales de augita[II], además de que intersticialmente presenta crecimiento de cristales de olivino y piroxenos[III] y tiene fenocristales zoneados de plagioclasa[IV].

La matriz también cuenta con vesículas de vidrio basáltico, existe presencia abundante de micro cristales de óxidos, aproximadamente 20% de óxidos de hierro (magnetita[V]), además de tener intersticios rellenos de cristales subedrales de augita.



Figura 25.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-03.

.

De acuerdo a los minerales que se pueden observar, la roca es buena candidata para reaccionar con CO_2, ya que sus minerales contienen los elementos principales que se necesitan para llevar a cabo la reacción de disolución (ver esquema de reacción 2), que son Ca, Mg y Fe.

[II] Mineral con fórmula química $Mg_2SiO_4 – Fe_2SiO_4$[50]
[II] Mineral con fórmula química $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$[50]
[III] Mineral con fórmula química $(Mg,Fe)SiO_3$[50]
[IV] Mineral con fórmula química $NaAlSi_3O_8 – CaAl_2Si_2O_8$[50]
[V] Mineral con fórmula química $Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4$[50]



Figura 26.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-03'.

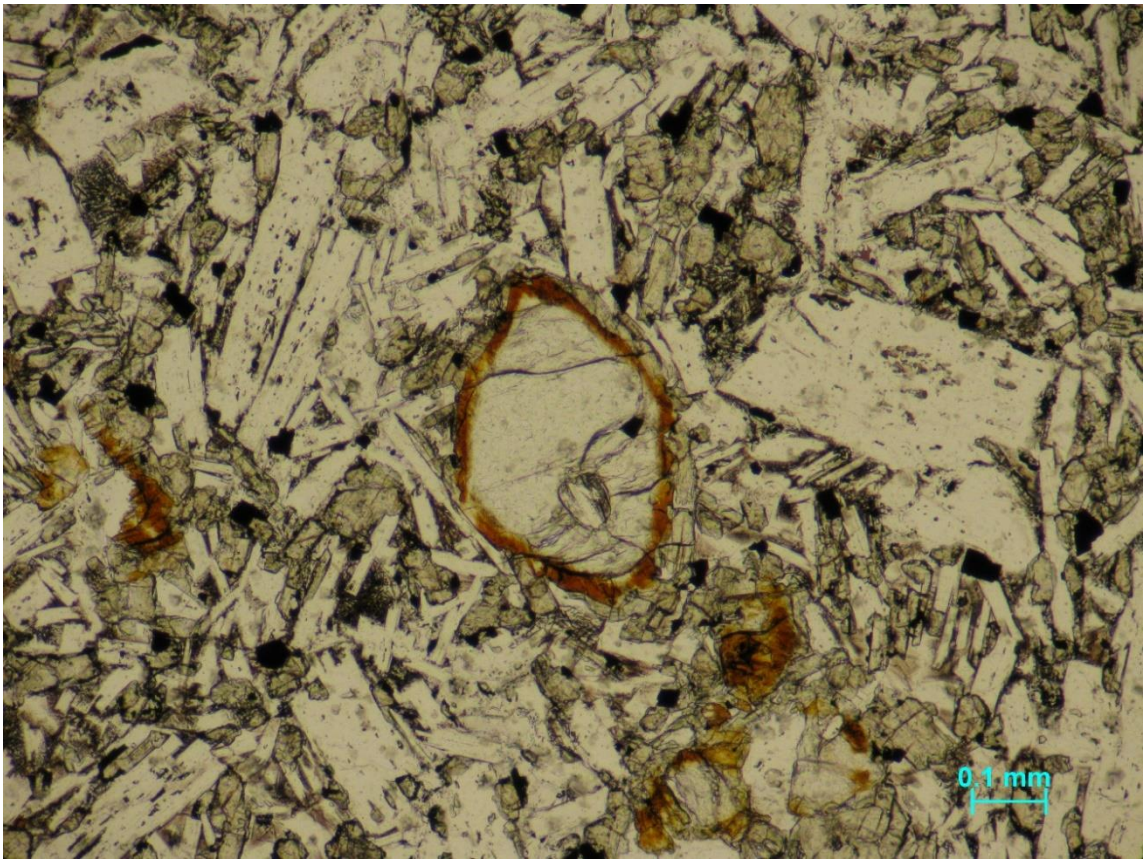


Figura 27.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles paralelos de la lámina Tlax-03.

5.1.1.2. Análisis Petrográfico de Tlax-05.

- Textura: Porfídica seriada con glomerocristales y presenta dominios de textura fluidal.
- Matriz: Presenta vesicularidad alta, y compuesta principalmente de glomerocristales de olivino y plagioclasa.

La matriz presenta olivino y cristales de piroxeno que tienen incluidos cristales de plagioclasa, además de que presenta muchos óxidos como la magnetita.

La roca presenta fenocristales de plagioclasa, olivino fracturado anedral alterado por iddingsita, también contiene plagioclasas con textura de tamiz.

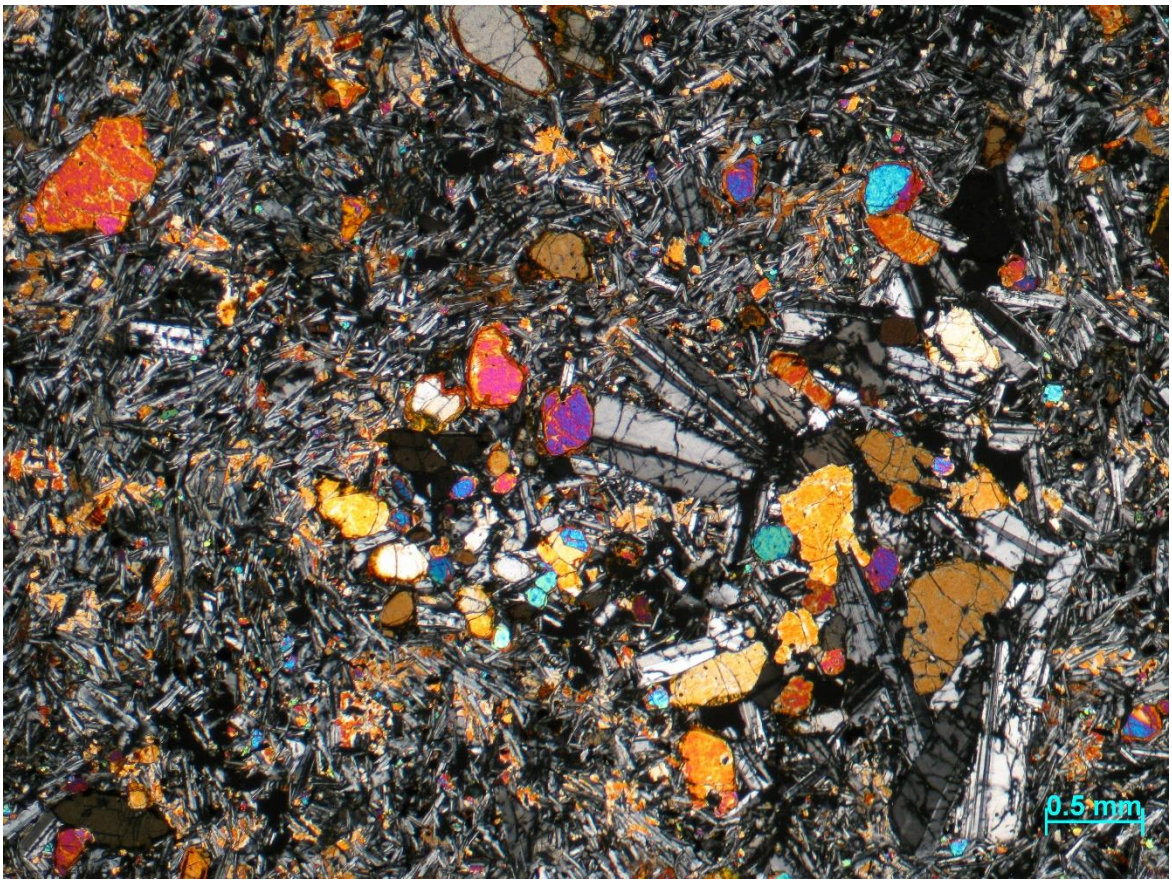


Figura 28.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax5'.

Al igual que Tlax-03, Tlax-05 mostró una gran cantidad de minerales que favorecen la disolución mineral en presencia de CO_2 disuelto en agua, por lo que ambas muestras de roca, a pesar de estar intemperizadas, podrían ser consideradas como buenas candidatas para mineralizarse en presencia de CO_2.



Figura 29.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-05.

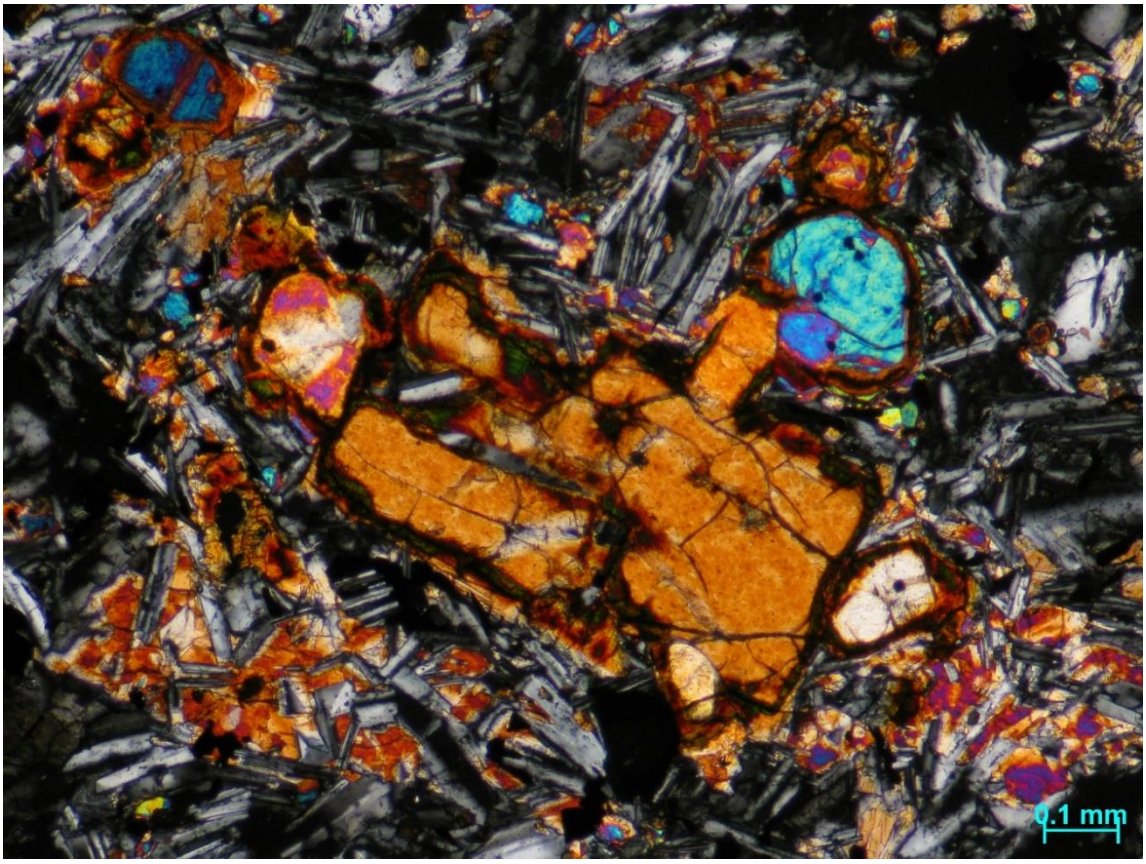


Figura 30.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles cruzados de la lámina Tlax-05.

Las láminas se analizaron cualitativamente de acuerdo a su composición en porcentaje. La Tabla 11 muestra los principales componentes de las muestras Tlax-03 y Tlax-05. La tabla con todas las láminas se encuentra en el Apéndice A (Tabla A1)

Tabla 11.- Composición aproximada, en porcentaje de las rocas.

Muestra/Mineral	Olivino %	Augita %	Carbonatos %	Plagioclasas %	Vidrio %	Óxidos de Fe %	Enstatita %
Tlax-03	8	15	-	65	8	4	-
Tlax-03’	5	15	-	70	5	5	-
Tlax-05	8	20	-	58	6	8	-
Tlax-05’	8	25	-	50	5	12	-

Como se mencionó anteriormente, el principal componente (cualitativamente) de ambas muestras son las plagioclasas junto con la augita, al tener éstas un gran contenido en Fe, Mg y Ca principalmente, la disolución mineral se podría dar de manera similar a la del proyecto CarbFix.

5.1.2. Resultados de análisis de Difracción de Rayos X de Polvos.

La difracción de rayos-X de polvos es un método que permite identificar a los minerales por su estructura cristalina. Esto es posible debido a que los minerales son cristalinos y la distribución regular en el espacio de sus componentes se describe por medio de las redes cristalinas, que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral. Una celda es una unidad en forma de paralelepípedo que, repetida idénticamente, llena todo el espacio del cristal, y la descripción de la celda proporciona la información sobre la estructura cristalina del material. Existen dos niveles de descripción de la celda:

- Los parámetros del paralelepípedo. Tres aristas (a, b, c) y tres ángulos (α, β, γ).
- Disposición de átomos en la celda.

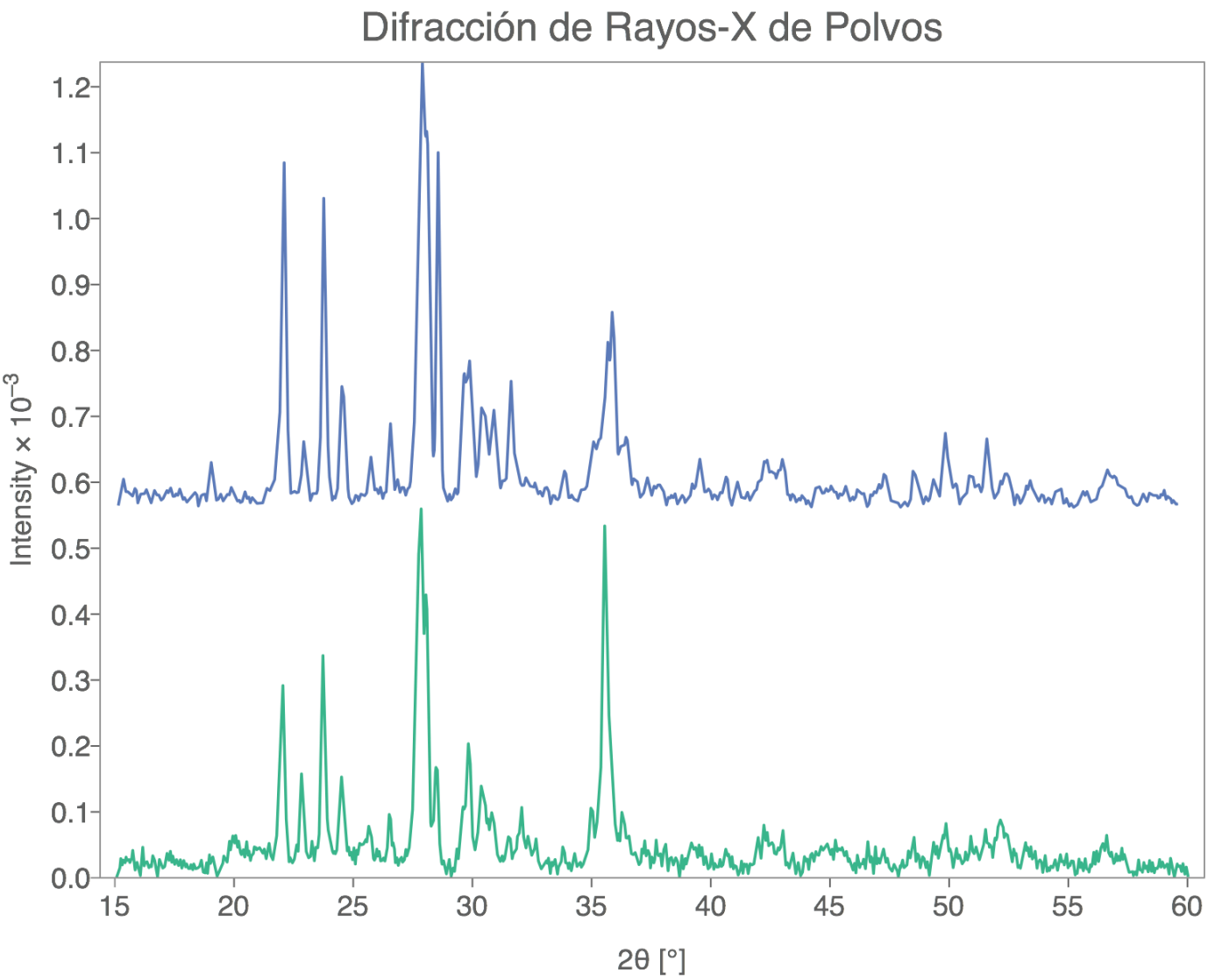
La difracción de polvo cristalino nos informa sobre estos 2 niveles, por lo que nos permite distinguir minerales con redes similares.

La muestra de mineral o de roca se prepara reduciéndola a polvo fino, y se extiende sobre un portamuestras. Al pulverizar la roca se obtiene un número muy elevado de pequeños cristales, los cuales pueden reflejar los rayos-X. El instrumento para la medida del difractorama[I] es el difractómetro, el cual está formado por una fuente de rayos-X, un portamuestras montado sobre un geniómetro[II] giratorio y un detector. El portamuestras gira según la trayectoria de un haz colimado de rayos-X, mientras que el detector, que se encuentra montado en un brazo, gira alrededor para captar las señales difractadas de los mismos.

Una vez que se obtiene el difractograma[III] y los datos de la muestra analizada, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral cuyo difractograma corresponde.[39]

Para este método se realizó un análisis de 6 muestras de polvo de basalto, de Tlax-01, Tlax-03, Tlax-05, Tlax-06 y Tlax-07, excluyendo Tlax02 y Tlax04. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos para Tlax-03 y Tlax-05. Los resultados de Tlax-01, Tlax-06 y Tlax-07 se pueden encontrar en el Apéndice A.

[I] En este se obtiene un listado de picos de difracción, junto con su intensidad, en función del ángulo de incidencia más el ángulo de reflexión.[51]
[II] Facilita la correcta orientación del haz de la luminaria sobre el objeto plano deseado.
[III] Gráfico que en las abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente.



Gráfica 3.- Comparación de difracción de rayos-X de polvo entre Tlax-03 (verde) y Tlax-05 (azul).

Esta prueba identificó principalmente 3 minerales en Tlax-03 y Tlax-05; Labradorita $Ca_{0.68}Na_{0.30}(Al_{1.66}Si_{2.34}O_8)$, Silicatos de hierro con calcio y magnesio $Ca_{0.90}Mg_{0.71}Fe_{0.25}Si_2O_6$, y Forsterita $Mg_{1.83}Fe_{0.18}SiO_4$. Para este caso de estudio se tomaron como principales muestras Tlax-03 y Tlax-05, como aquellas con mayor potencial, debido a los contaminantes identificados, la erosión y el contenido de ciertos minerales.

5.1.3. Resultados de análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Un espectrómetro de fluorescencia de rayos-X es un instrumento utilizado para análisis químicos no destructivos de rocas, minerales, sedimentos y fluidos.

El método depende de principios que involucran interacciones entre electrones y rayos-X. El análisis de elementos mayores y trazas en materiales geológicos mediante la fluorescencia de rayos-X es posible debido al comportamiento de los átomos cuando estos interactúan con radiación, cuando algún material está excitado con un alto nivel de energía, la radiación de longitud de onda corta puede ionizarse. Si la energía de radiación es suficiente para desalojar electrones internos estrechamente sujetos, el átomo se vuelve inestable y electrones ajenos reemplazan el electrón interno faltante.

Cuando esto ocurre, se libera energía, por lo que la fluorescencia de los rayos-X puede ser utilizada para detectar la abundancia de elementos que estén presentes en una muestra.[40]

Algunas aplicaciones de esta técnica incluyen:

- Investigación petrológica en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas
- Estudios de suelo
- Minería (medición del grado de oro)
- Producción de cemento
- Manufactura de vidrio y cerámica
- Metalurgia (control de calidad)
- Estudios ambientales (análisis en materia de filtros de aire)
- Industria del petróleo (contenido de sulfuro en petróleo y productos de este)
- Análisis de campo en estudios geológicos y ambientales[40]

Los resultados de Tlax-03 y Tlax-05 son los siguientes:

Tabla 12.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-03.

ID de la muestra:	**Tlax -03**	
Marca de Tiempo	10 : 31 : 57 2017-04-26	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	46.13	0.072
Aluminio	16.79	0.008
Hierro	5.78	0.006
Magnesio	0.22	1.135
Calcio	6.8	0.082
Sodio	4.31	0.437
#	ID	Resultado %
1	Silicio	46.04
1	Aluminio	16.78
1	Hierro	5.77
1	Magnesio	ND
1	Calcio	6.69
1	Sodio	3.93
2	Silicio	46.21
2	Aluminio	16.79
2	Hierro	5.78
2	Magnesio	1.42
2	Calcio	6.88
2	Sodio	4.08
3	Silicio	46.15
3	Aluminio	16.8
3	Hierro	5.78
3	Magnesio	0.54
3	Calcio	6.84
3	Sodio	4.92

Tabla 13.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-05.

ID de la muestra:	**Tlax -05**	
Marca de Tiempo	15 : 59 : 12 2017-04-07	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	49.653	0.2201
Aluminio	21.837	0.8206
Hierro	8.906	0.0042
Magnesio	3.234	1.7475
Calcio	7.627	0.1068
Sodio	3.933	0.4733
#	ID	Resultado %
1	Silicio	49.481
1	Aluminio	20.684
1	Hierro	8.900
1	Magnesio	3.684
1	Calcio	7.523
1	Sodio	4.584
2	Silicio	49.514
2	Aluminio	22.304
2	Hierro	8.909
2	Magnesio	5.114
2	Calcio	7.584
2	Sodio	3.473
3	Silicio	49.963
3	Aluminio	22.524
3	Hierro	8.910
3	Magnesio	0.905
3	Calcio	7.774
3	Sodio	3.743

Los resultados obtenidos de las pruebas Tlax-02, Tlax-04, Tlax-06 y Tlax-06dup se encuentran en el Apéndice A

Como se puede observar en los resultados de este experimento, las rocas tienen un alto contenido de silicio, lo cual pudiera no ser tan benéfico para el proceso de disolución. Por otro lado, es importante resaltar que se observa para estas muestras la presencia de iones divalentes, como el hierro, magnesio y calcio los cuales son benéfico para el método de almacenamiento de CO_2 en basaltos. Cabe destacar que el porcentaje de sodio determinado debe ser tomado con reservas ya que el equipo presenta un error de hasta el 30% para dicho elemento.

5.1.4. Inyección de CO_2 en una muestra de basalto

Una vez realizadas las pruebas y análisis anteriores se determinó que las muestras Tlax-03 y Tlax-05 son las más prometedoras para ser sometidas a una reacción de mineralización con CO_2. Debido a que en su composición se presentan iones divalentes en abundancia, indicando una gran posibilidad de disolución y mineralización. Los pasos realizados, descritos en las siguientes secciones, para llevar a cabo este experimento fueron:

- Construcción de un sistema de burbujeo de CO_2, conectado a un recipiente con agua y roca
- Limpieza de las muestras (rocas) a utilizar
- En el recipiente del sistema de burbujeo se colocó agua y las muestras de roca
- Se llevó a cabo el burbujeo de CO_2 en los recipientes con agua y rocas
- Filtración y Análisis de sólidos disueltos en agua

5.1.4.1. Sistema de burbujeo de CO_2

Para construir el sistema se ocupó un regulador de flujo para gases, mangueras de hule, una línea de acero inoxidable con entrada de rosca NPT, ampolletas de CO_2 de 16 y 25 g, vasos de precipitados de 10 y 250 mL, un pH-metro, y un termómetro de mercurio.

Al regulador de flujo se le conectaron 2 mangueras a la salida, para poder burbujear el CO_2 y otra a la entrada, que a su vez se conectó a la línea de acero. A la línea de acero, en la rosca de entrada se le adaptó un remache ciego afilado en la punta, y una tuerca lijada que se adaptara al diámetro de la rosca y que centrara el remache.

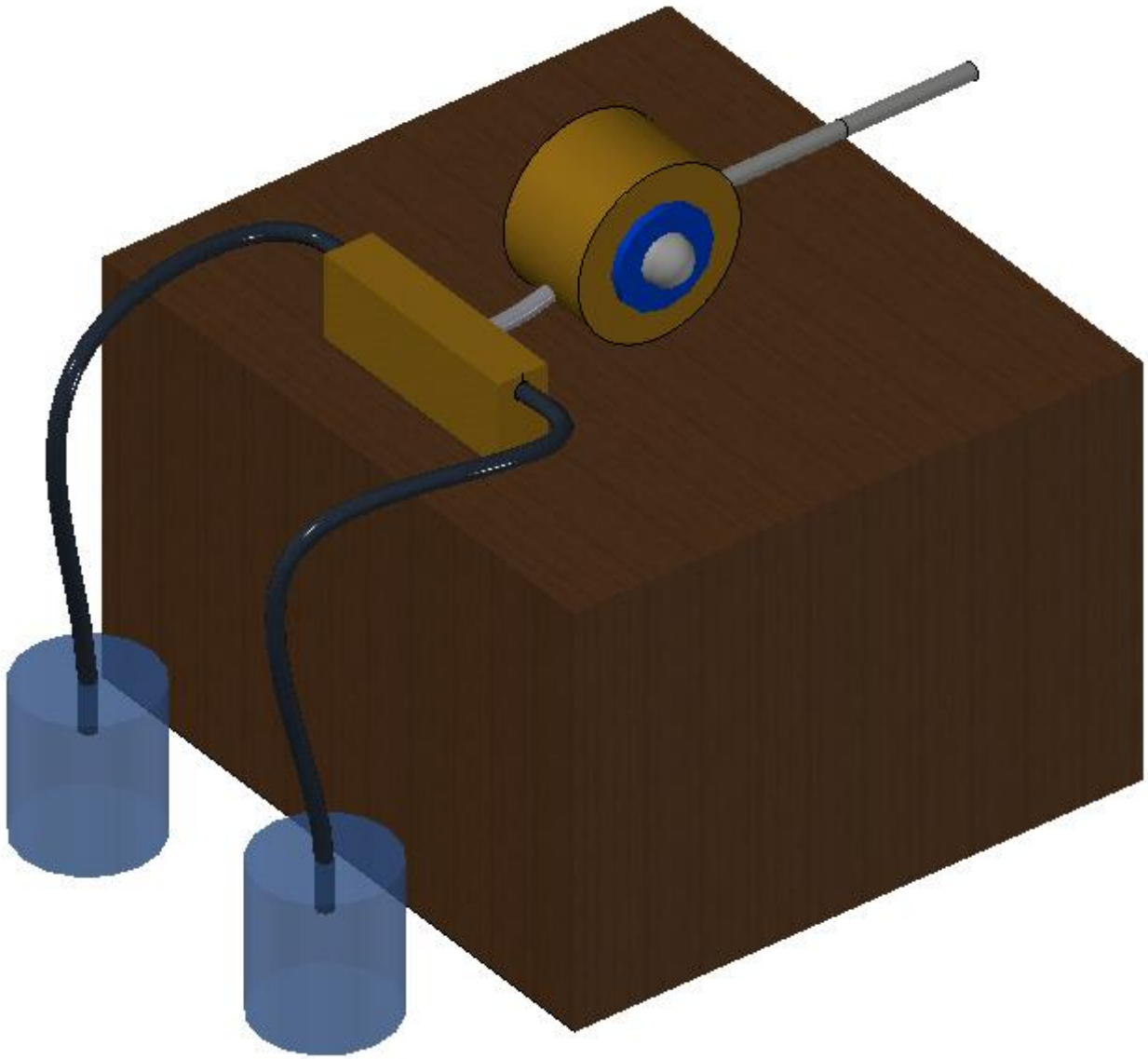


Figura 31.- Esquema del sistema de burbujeo de CO_2 utilizado.

5.1.4.2. Limpieza de muestras

Se cortaron 2 pedazos de las rocas recolectadas, uno de Tlax-03 y uno de Tlax-05. Una vez recortadas (de las partes mejor conservadas y menos contaminadas), se tomó el peso de cada una. Tlax-03 pesó 15.551 g y Tlax-05 14.753 g. Posteriormente, se llevó a cabo la limpieza de las muestras. Se cepillaron las rocas para remover polvo superficial y algunos contaminantes a los que la roca estuvo expuesta, después se sumergieron en isopropanol (C_3H_8O), por duplicado, con el fin de remover la mayor cantidad de agentes externos a la roca y así tener una muestra lo más limpia posible. Una vez que las muestras pasaron 30 minutos sumergidas en isopropanol, se dejaron escurrir por un breve periodo de tiempo y posterior a eso fueron sometidas a una temperatura de alrededor de 100 °C durante 15 minutos, para evaporar cualquier filtración de isopropanol y tener una muestra seca.

Después de la limpieza, ambas muestras presentaron cambio en su peso, Tlax-03 alcanzó un peso de 15.463 g y Tlax-05 un peso de 14.283 g.

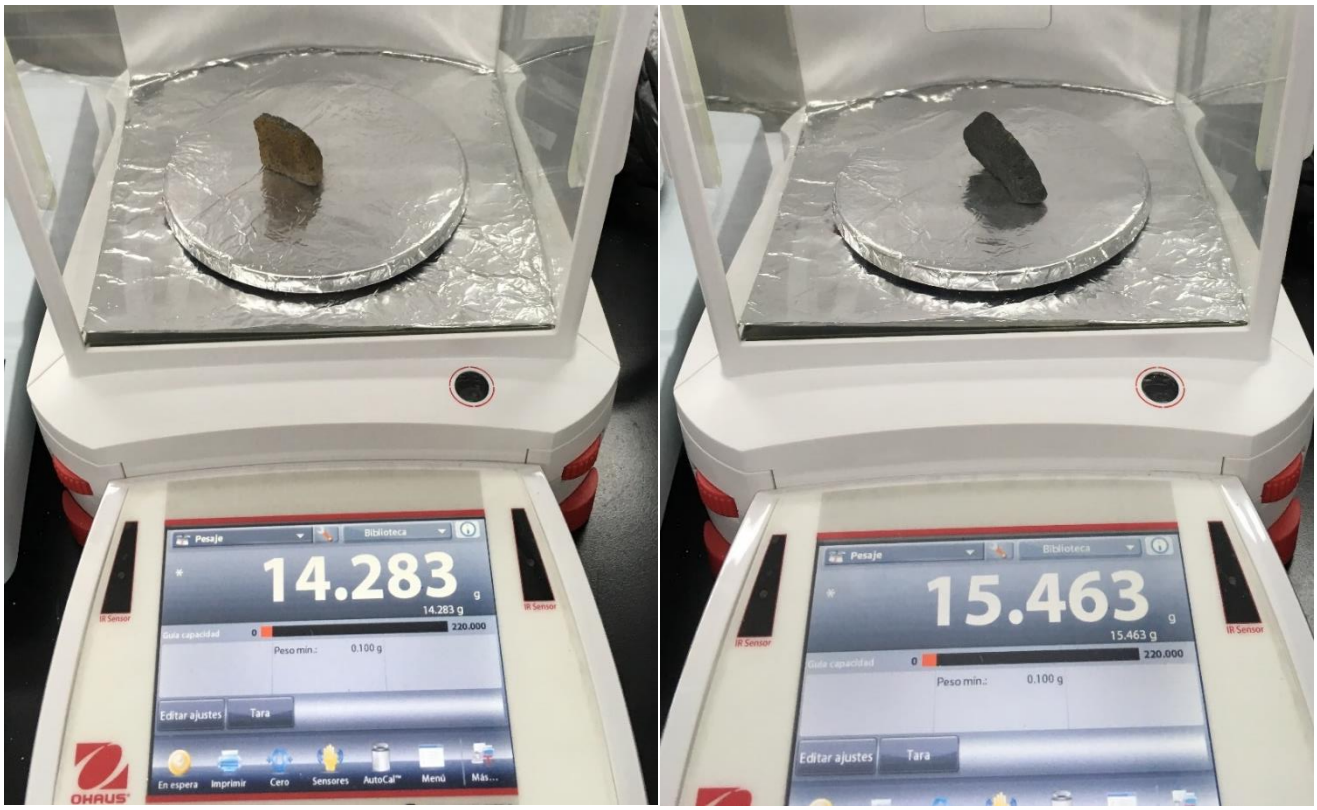


Figura 32.- Muestras Tlax-05 a la izquierda y Tlax-03 a la derecha después su limpieza.

5.1.4.3. Burbujeo de CO_2 en basaltos sumergidos en agua

El burbujeo de CO_2 en las muestras se realizó en 3 pruebas, utilizando 2 ampolletas de 25 g y 1 de 16g. Cabe mencionar que cada ampolleta burbujeó CO_2 a ambos recipientes, los cuales contenían las muestras Tlax-03 y Tlax-05. Durante cada una de las pruebas se realizaron observaciones del tiempo de burbujeo, pH antes y después de cada inyección, y al finalizar la medición de pH en cada muestra, éstas se sellaron por determinados periodos tiempo para observar si ocurría alguna reacción.

Para la primera inyección, ambas muestras (Tlax-03 y Tlax-05) se colocaron en un vaso de precipitado de 250 ml y se sumergieron en 75 ml de agua destilada. Una vez conectado el circuito, se conectó una ampolleta de 16 g de CO_2.Para observar si en realidad existía alguna reacción entre la roca-agua-CO_2,

sólo Tlax-05 se sometió a burbujeo durante aproximadamente 31 segundos, y éste comenzó una vez abierta la válvula de baja presión del regulador de flujo. El pH del agua destilada utilizada es de 7.00.

Durante la inyección de CO_2 el recipiente fue sellado para mantener el CO_2 el mayor tiempo posible disuelto en el agua. Al finalizar el burbujeo se tomó la medición del pH en Tlax-05, cuyo valor fue de 5.02, posterior a la medición el recipiente fue sellado por completo y se dejó reposar por 3 días. Transcurrido este lapso de tiempo, el recipiente con la muestra en reposo (Tlax-03) presentó un pH de 7.69 y Tlax-05 de 8.23, lo que pudiera representar disolución de algunos componentes de la roca en Tlax-05, haciendo el contenido en el agua más básico.

Pasado el lapso de 3 días se extrajeron ambas muestras y una vez secadas en el horno a 100 °C, Tlax-03, pesó 15.458 g y Tlax-05 pesó 14.135 g. Las pérdidas de masa para ambas muestras son de; 5 mg (Tlax-03) y 148 mg (Tlax-05), observándose mayor pérdida de masa para la muestra que estuvo en contacto con CO_2. El agua residual en ambos vasos de precipitado, se filtró para analizar si había sólidos sueltos o sin disolver. El resultado fue que para Tlax-03 no se encontró sólido alguno o la presencia era casi nula, mientras que para Tlax-05 se podía observar una ligera cantidad de sólidos en el papel filtro, alcanzando un peso de apenas 0.005 g, lo que podría significar la suspensión de algunos sólidos de la roca al estar en presencia del burbujeo de CO_2 en el agua.

Para la segunda prueba se utilizaron 75 ml de agua destilada y las muestras Tlax-03 y Tlax-05 (después de haber sido limpiadas), los datos iniciales fueron los siguientes:

Tabla 14.- pH del agua destilada con las muestras sumergidas y peso de cada muestra de roca antes de ser sumergida.

Muestra	pH (agua destilada)	Peso (g)
Tlax-03	7.82	15.458
Tlax-05	7.71	14.135

En esta prueba se burbujeo una ampolleta de 25 g durante aproximadamente 2 minutos a ambas muestras. Una vez terminado el burbujeo de CO_2 en ambos vasos de precipitados se midió el pH del agua, obteniendo para Tlax-03 un valor de 4.63 y Tlax-05 un valor de 4.77, lo que indica una acidificación del agua debido al burbujeo de CO_2. Al finalizar las mediciones ambos recipientes se sellaron y se dejaron reposar durante 4 días para tomar más mediciones y posteriormente realizar otra inyección. Cuatro días después se tomó el valor de pH; Tlax-03 presentó un valor de 6.41 y Tlax-05 de 5.91.

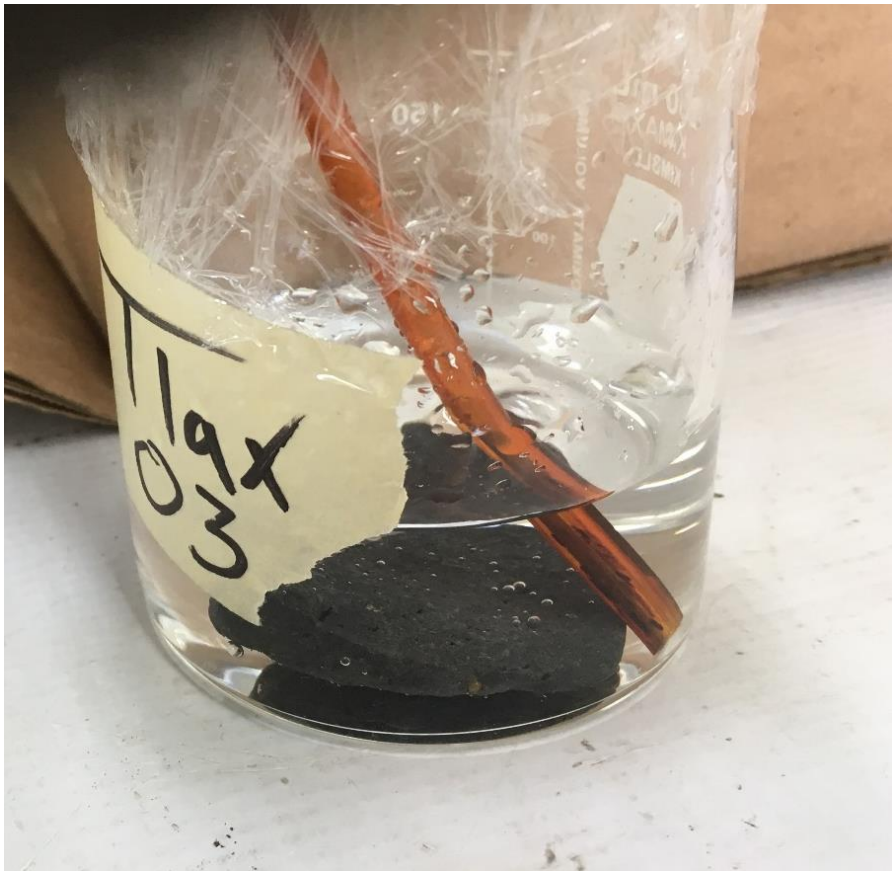


Figura 33.- Fotografía del CO_2 siendo burbujeado en la muestra de roca de basalto sumergida en agua destilada.

La tercera prueba se realizó 7 días después, en las muestras anteriormente selladas. Se burbujeó CO_2, durante aproximadamente 3 minutos, pasado este tiempo se midió el pH del agua y para Tlax-03 resultó de 5.27 y para Tlax-05 de 5.12. Al finalizar la medición ambas muestras se sellaron para su posterior análisis de sólidos disueltos. Las muestras permanecieron selladas por 50 días, y el pH final medido en Tlax-03 fue de 7.23 y el de Tlax-05 de 7.97.

5.1.4.4. Análisis de sólidos disueltos

Para analizar el contenido de sólidos disueltos en agua principalmente Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+}, también conocido como análisis de dureza del agua, se utilizó la determinación de iones divalentes empleando EDTA (ácido etilendiamino-tetra-acético). El EDTA es un ácido débil para el cual pK1=0.0, pK2=1.5, pK3=2.0, pK4=2.66, pK5=6.16, pK6=10.24, dónde los primeros 4 valores se refieren a los protones ácidos que se perderán con mayor facilidad (ácidos carboxílicos; -COOH) y los últimos 2 a los últimos a los grupos de amonio (-HN+). Para realizar la determinación de iones divalentes es necesario partir de un pH alcalino, de por lo menos 10.

El proceso consiste en agregar la solución EDTA al compuesto que se desea analizar, y si este contiene Ca^{2+}, Mg^{2+} o Fe^{2+}, el EDTA sufrirá una desprotonación (pérdida de H^+ por hidrólisis) de los grupos carboxílicos y de amonio, haciendo posible la formación de complejos estables 1:1, es decir por cada Ca^{2+}, Mg^{2+} o Fe^{2+} que se tenga el EDTA perderá un H.

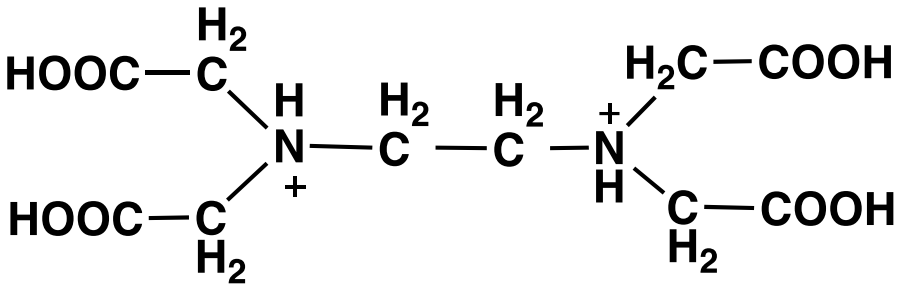


Figura 34.- Estructura del EDTA.[41]

Debido a que el Ca^{2+}, el Mg^{2+} y el Fe^{2+} tienen constantes de formación de complejos, con EDTA, muy cercanas resulta bastante difícil valorar cada uno de los iones de manera independiente, por lo que es común realizar la determinación conjunta de estos iones.[41]

El experimento se realizó 50 días después del último burbujeo con CO_2, con el fin de reposar las muestras y determinar la presencia de iones divalentes en la disolución. Para realizar dicha determinación, se colocaron 10 mL del agua muestra, expuesta a la roca y CO_2, en un vaso de precipitados, se agregó 1 mL de buffer y se añadieron un par de gotas de fenolftaleína. Por otra parte, se cargó una bureta volumétrica con 50 mL de una solución EDTA (0.01 M).

$$50\ ml\ EDTA * \frac{0.01\ mol}{1{,}000\ ml} = 0.0005\ mol * 292.24\ \frac{g}{mol} = 0.14612\ g \ldots\ldots\ldots (9)$$

Donde 292.24 g/mol representan la masa molecular del EDTA.

El buffer se utilizó para mantener fijo el valor de pH del agua muestra, 11.6. Dicho buffer se preparó con Borax hidratado, ($B_4Na_2O_7$–$10H_2O$; 381.3722 g/mol). Para preparar el buffer, primero se preparó 100 mL de una solución de Borax (0.025 M).

$$100\ ml\ Solución\ Borax * \frac{0.025\ mol}{1{,}000\ ml} * 381.37\ \frac{g}{mol} = 0.954325\ g \ldots\ldots\ldots (10)$$

Una vez obtenida la solución de Borax se prepararon 36.6 mL de una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH), 0.1 M.

$$36.6\ ml\ NaOH * \frac{0.1\ mol}{1{,}000\ ml} * 39.99714\ \frac{g}{mol} = 0.1463895\ g \ldots\ldots\ldots (11)$$

Una vez preparadas las soluciones de Borax y de NaOH, ambas se mezclaron y se obtuvieron 136.6 mL de buffer.

Por último, se empleó fenolftaleína como agente indicador, utilizando 100 mL de agua destilada y 0.1 g de este compuesto. La solución resultante se utilizó para añadir color a la muestra de agua, la cual se agregó a la muestra que contiene iones divalentes (Ca^{2+}, Mg^{2+} o Fe^{2+}) y el buffer. Cabe mencionar que este colorante se emplea para observar cambios en el pH. A pH ácidos la fenolftaleína permanece incolora, mientras que a pH básicos la fenolftaleína se torna rosa intenso o magenta.

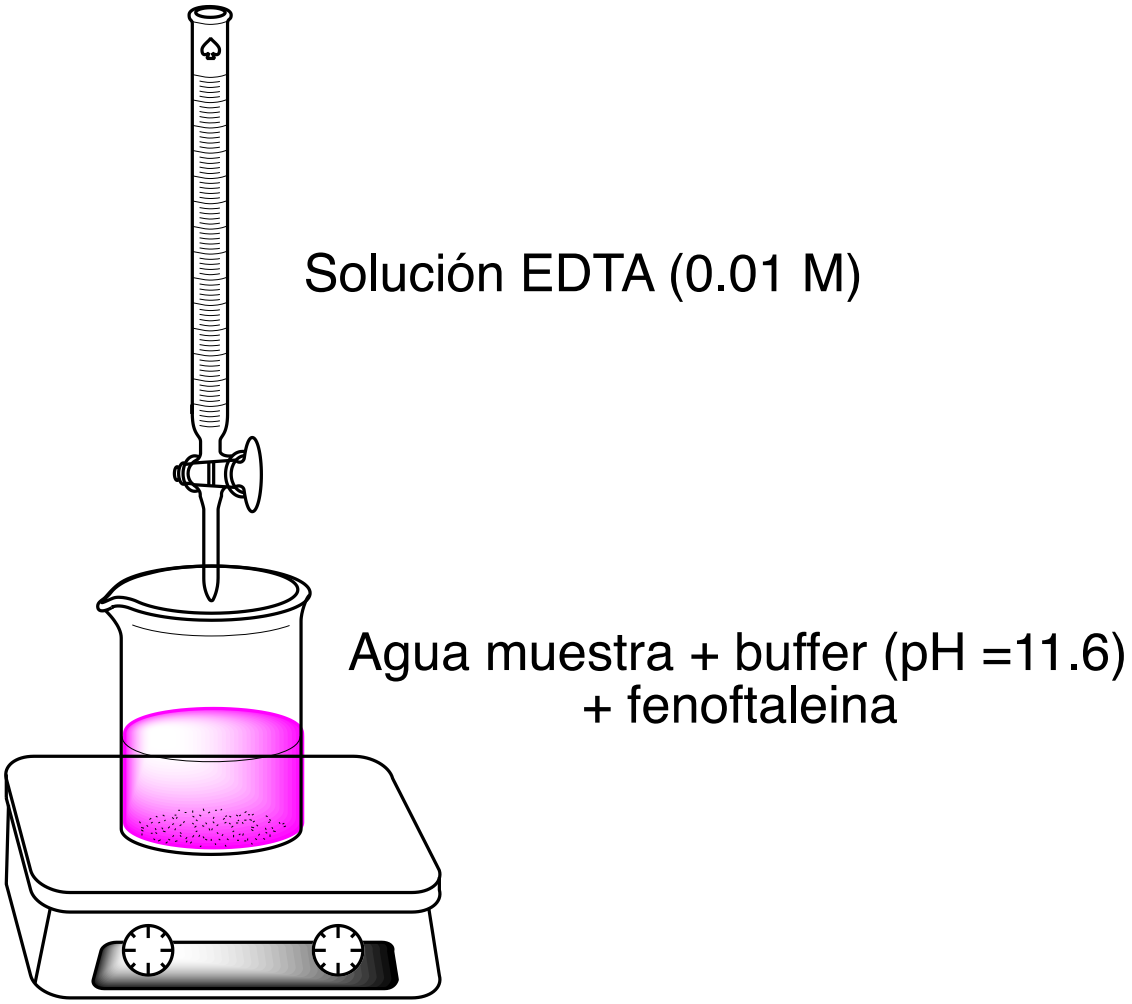


Figura 35.- Dispositivo empleado para la determinación de iones de Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+}.

La determinación de los iones divalentes se llevó a cabo para Tlax-03 y Tlax-05 por duplicado, cada una. Para este experimento se utilizaron 10 mL de agua muestra, 1 mL de buffer (con la finalidad de mantener el pH en 11.6), y 2 gotas de indicador colorido (fenolftaleína). Todas las muestras presentan una coloración rosa intenso.

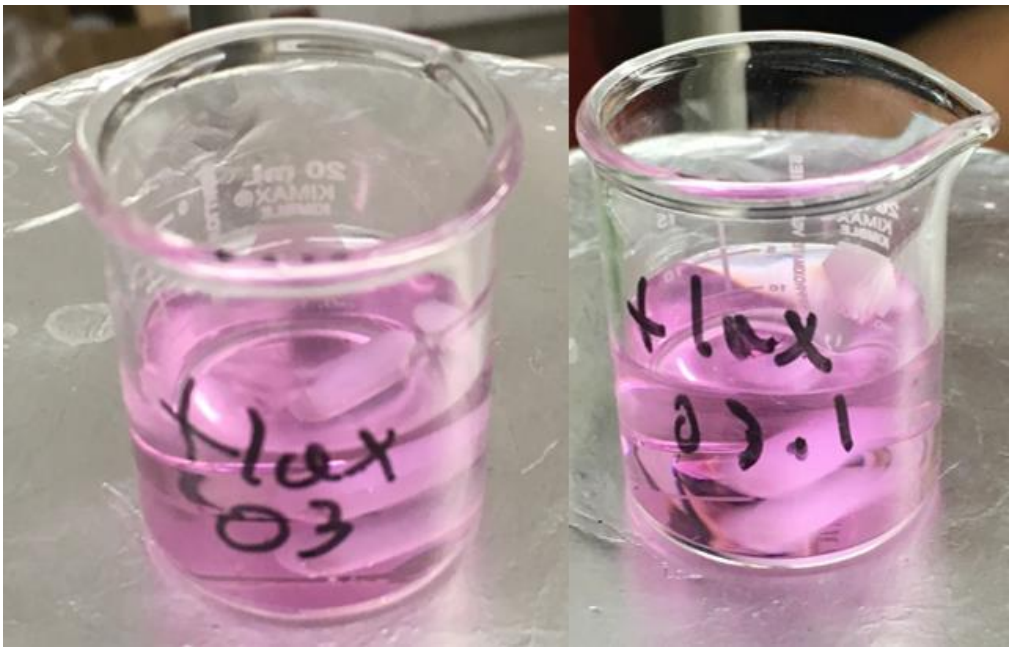


Figura 36.- Muestras de Tlax-03 después de agregar fenolftaleína.

Una vez preparadas las disoluciones se agregó gota a gota la disolución de EDTA bajo agitación mecánica. Tras la adición de varias gotas, la disolución cambió de rosa intenso a violeta claro, confirmando así la presencia de iones de Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+}. En el caso de Tlax-03 se consumieron 0.875 mL de EDTA para observar el cambio de coloración, mientras que para Tlax-05 se consumieron 1.1 mL de EDTA, lo que significa que esta muestra tiene un contenido mayor de iones disueltos con respecto a Tlax-03. Nótese que Tlax-05 estuvo expuesta a una mayor cantidad de CO_2 durante experimentos previos.

Una vez que se cuantificó la cantidad de EDTA consumido para observar un cambio en la coloración de la disolución, se determinó la cantidad de (g) de iones divalentes disueltos a partir de los resultados obtenidos. Como se mencionó anteriormente, al no poder diferenciar entre Calcio, Hierro y Magnesio utilizando este método, se hicieron cálculos para cada uno, considerando que todos los iones presentes corresponden a una sola especie por determinación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos. En la figura “x” puede observarse la formación de los complejos EDTA con los iones divalentes.

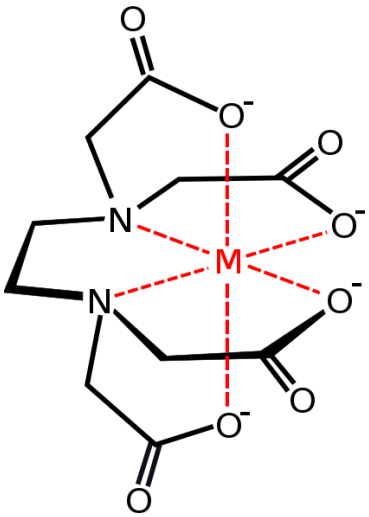


Figura 37.- El EDTA atrapa los iones divalentes presentes en la disolución M = a Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+}.

Para Tlax-03:

$$\frac{0.86\ g\ EDTA}{ml} * \ .875\ ml\ EDTA = .7525\ g\ Utilizados\ de\ EDTA \ldots\ldots\ldots (12)$$

Suponiendo que todos los iones atrapados por el EDTA son Ca^{2+}. 0.86 g/ml es la densidad del EDTA y 0.875 mL es la cantidad consumida del mismo.

$$0.7525\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Ca}{1\ mol\ EDTA} * \frac{40\ g}{mol\ Ca} = \ 0.1030\ g\ de\ Ca \ldots\ldots\ldots (13)$$

Donde 40 g/mol se refieren a la masa molecular del Calcio. Se asume que 1 mol de Ca se asocia con 1 mol de EDTA. Como se puede apreciar en la figura 34, la estructura del EDTA tiene 4 grupos carboxilo y 2 amonio, los cuales se desprotonan y atrapan al ion divalente Ca^{2+}.

Ahora, si se asume que todos los iones divalentes son el Mg^{2+} tenemos que:

$$0.7525\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Mg}{1\ mol\ EDTA} * \frac{24\ g}{mol\ Mg} = \ \ 0.0618\ g\ de\ Mg \ldots\ldots\ldots (14)$$

Donde 24 g/mol es la masa molecular del Mg. Al igual que el Calcio, 1 mol de Mg^{2+} se asocia con un mol de EDTA.
Por último, si se asume que todos los iones divalentes son de Fe^{2+}, tenemos que:

$$0.7525\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Fe}{1\ mol\ EDTA} * \frac{56\ g}{mol\ Mg} = \ \ 0.1442\ g\ de\ Fe \ldots\ldots\ldots (15)$$

Donde 56 g/mol es la masa molecular de Fe. De la misma manera que el Mg^{2+} y el Ca^{2+}, un mol de Fe^{2+} se asocia con un mol de EDTA.

Al analizar los resultados obtenidos de la muestra Tlax-03, se confirma que al burbujear CO_2 en agua con una muestra de basalto sumergido en ésta, se disuelven algunos iones presentes en el del basalto. Si bien la cantidad es pequeña, esto se debe principalmente a 3 factores; el tiempo de exposición del CO_2 en la muestra, la cantidad inyectada de CO_2 y las condiciones de presión y temperatura a las cuales se llevó a cabo el experimento, así como las propiedades de a muestra analizada.

Para Tlax-05:

$$\frac{0.86\ g\ EDTA}{ml} * \ 1.1\ ml\ EDTA = .946\ g\ Utilizados\ de\ EDTA \ldots\ldots\ldots (16)$$

Donde 1.1 ml es la cantidad agregada de EDTA a la muestra Tlax-05.

$$0.946\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Ca}{1\ mol\ EDTA} * \frac{40\ g}{mol\ Ca} = \ 0.1295\ g\ de\ Ca \ldots\ldots\ldots (17)$$

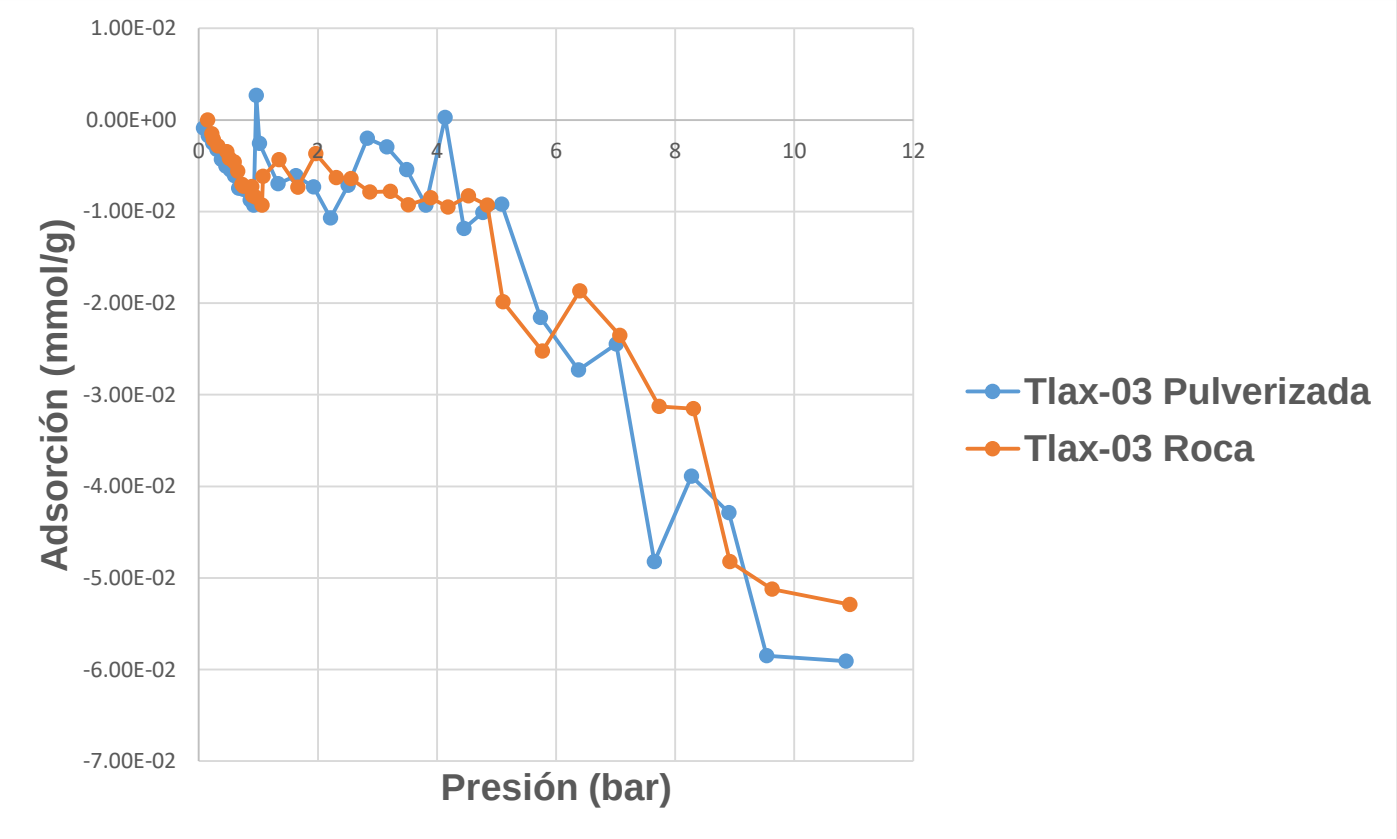
$$0.946\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Mg}{1\ mol\ EDTA} * \frac{24\ g}{mol\ Mg} = \ \ 0.0777\ g\ de\ Mg \ldots\ldots\ldots (18)$$

$$0.946\ g\ EDTA * \frac{1\ mol\ EDTA}{292.24\ g} * \frac{1\ mol\ Fe}{1\ mol\ EDTA} * \frac{56\ g}{mol\ Mg} = \ 0.1813\ g\ de\ Fe \ldots\ldots\ldots (19)$$

Se puede observar que tanto el contenido de Calcio, Hierro y de Magnesio es mayor al obtenido en la muestra Tlax-03, esto se debe a que Tlax-05 estuvo sometida a una mayor cantidad de CO_2 durante las primeras inyecciones. Lo anterior confirma que el burbujeo de CO_2 en las muestras de basalto sumergidas en agua disuelve los iones de interés de la roca. La cantidad de iones divalentes determinados puede deberse entre otros factores a las propiedades de la muestra analizada.

5.1.4.5. Determinación de la Porosidad de la Roca

Se realizaron dos pruebas de adsorción para Tlax-03. La primera prueba consistió en utilizar una muestra de roca; la segunda muestra se trató de roca pulverizada. Ambas muestras se activaron[l] al vacío y a una temperatura de 350 °C durante toda la noche. Posteriormente se llevaron a una temperatura de 200 °C y se llevaron a acabo los análisis, el cual consistió en la inyección de CO_2 gas a presión variable. De manera general, Tlax-03 no presenta buena capacidad de adsorción de CO_2 para ninguna de las muestras evaluadas, sin embargo, en la gráfica 6 se muestra que la roca pulverizada tiene menor capacidad de adsorber gases que la roca completa. Lo anterior nos indica que las muestras presentan una microporosidad muy pobre, aunque este resultado no implica que los basaltos no tengan la capacidad de mineralizar el CO_2. La tabla con los resultados puede consultarse en el Apéndice A, Tabla A8.



Gráfica 4.- Comparación de la capacidad de adsorción que tiene Tlax03, tanto la muestra de roca como el polvo de ésta.

[l] Se refiere a la activación térmica del material, es decir, ajustar el rango de temperatura del material que se someterá a una reacción química, para que la reacción se desarrolle de forma óptima y se eviten reacciones secundarias no deseadas.[52]

La gráfica muestra que la roca pulverizada tiene menor capacidad de adsorber gases que la roca completa, aun así en ambos casos la adsorción es despreciable.

5.1.4.6. Determinación de la integridad mecánica de la celda

Durante la realización de este trabajo, también se determinó la integridad mecánica de una celda, esto con la finalidad de realizar experimentos de inyección de CO_2 similares a los ya realizados, pero bajo condiciones de presión y temperatura mayores y de una manera más aislada.

La celda presentó fugas en un principio, pero se corrigieron conforme estos se presentaron. Se cambiaron los empaques y se ajustaron algunas partes. Después se sometió a algunas pruebas inyectando agua a presión, y resultó que la celda puede soportar hasta 27.21 atmósferas de presión. A pesar de que la celda está lista, los siguientes experimentos están planeados a realizarse a mediano plazo.

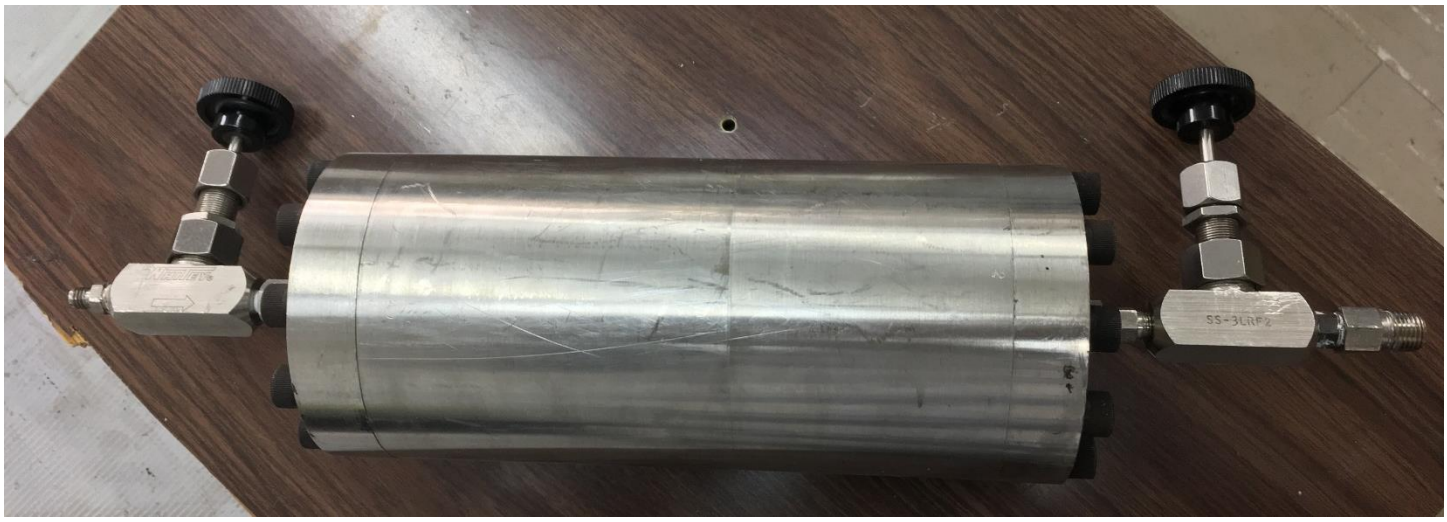


Figura 38.- Fotografía de la celda cilíndrica restaurada.

5.1.4.7. Resumen de los experimentos realizados

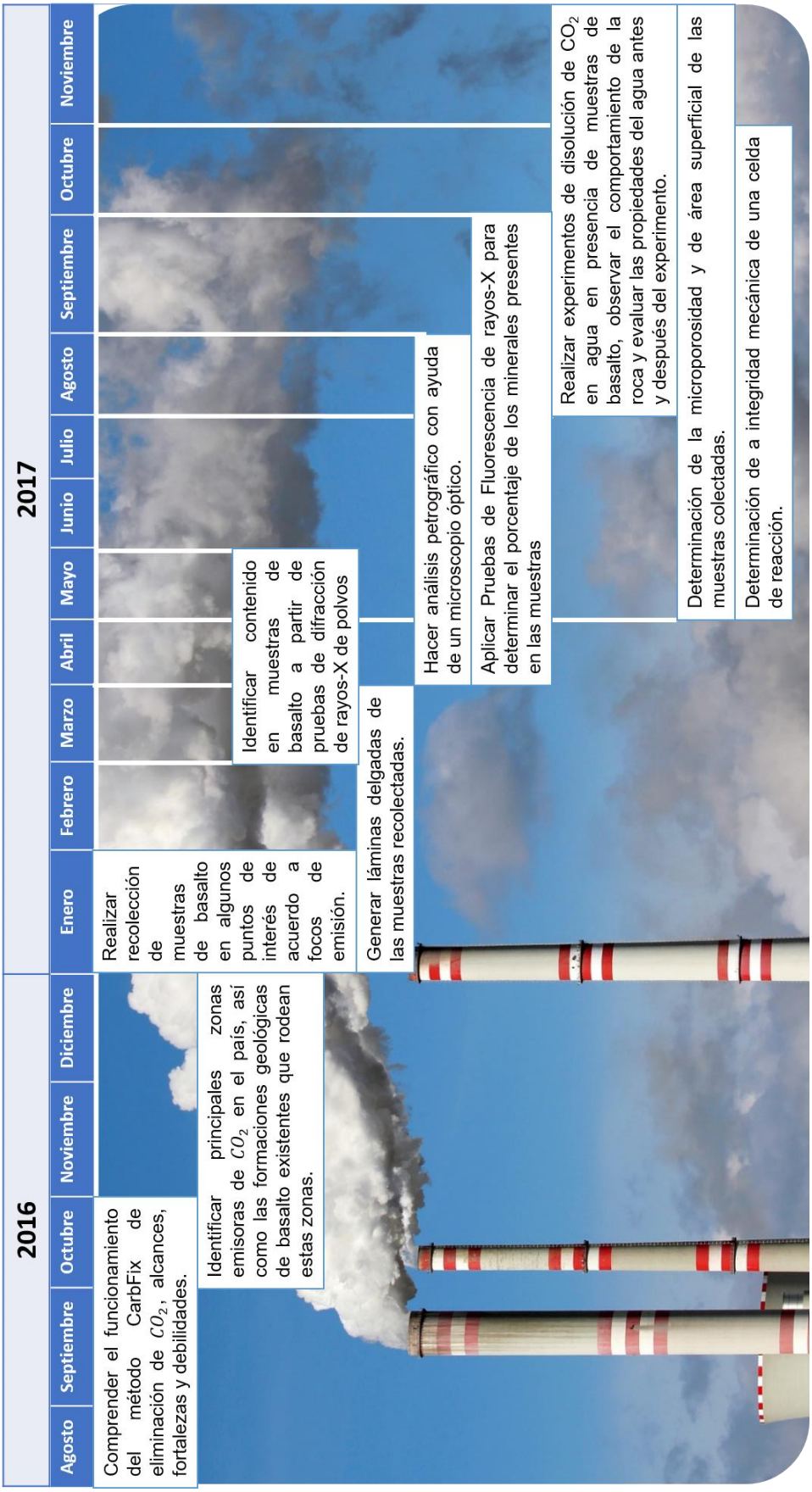


Figura 39.- Orden cronológico de las actividades realizadas durante este trabajo.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Con base en el trabajo realizado se puede concluir que el método de eliminación permanente de CO_2 empleando basaltos mexicanos podría ser factible. A través de los resultados obtenidos en cada prueba se comprobó que los basaltos de la zona analizada tienen la composición necesaria para mineralizarse, además de que al ser sometidos al burbujeo de CO_2 al estar sumergidos en agua, en efecto disolvieron los iones esperados. Si bien los experimentos realizados fueron a una escala mucho menor que los realizados en CarbFix cabe destacar que en cada prueba realizada se obtuvo suficiente información para concluir que el método de mineralización es viable. Sin embargo, ya se trabaja en la optimización de los experimentos presentados en este trabajo, así como a otras condiciones de presión y temperatura.

Como recomendaciones se tienen los siguientes puntos:

- Ampliar el estudio de basaltos a otras zonas del país.
- Colectar muestras de basalto en zonas menos superficiales, por lo tanto mejor conservadas, y así obtener una mejor caracterización.
- Continuar estudiando el subsuelo de las zonas basálticas en México.
- Suministrar una cantidad mayor de CO_2 de manera continua para observar la mineralización a mayor escala.
- Realizar experimentos de inyección de CO_2 en la celda a mayor presión y temperatura, además dar más tiempo a la reacción para observar una mineralización mayor.
- Una vez comprobada por completo la mineralización en basaltos Mexicanos hacer estudios de factibilidad económica para México.
- De ser posible realizar pruebas piloto en un campo para posteriormente aplicar el método.

Como información adicional, la siguiente tabla muestra información de los cotos del proyecto CarbFix, estimados en MXN con valor a su respectivo año.

Tabla 15.- Valor en MXN de los costos reportados en el proyecto CarbFix de 2006 a 2011.

Euros						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Ingresos Totales	**229,859**	**857,821**	**1,899,815**	**1,155,559**	**1,349,397**	**862,459**
Costos Totales de Operación	**244,658**	**671,275**	**1,126,407**	**1,565,375**	**1,063,059**	**873,476**
Ganancia/Pérdida Total	**-14,799**	**186,546**	**773,408**	**-409,816**	**286,499**	**-11,017**
MXN						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Ingresos Totales	**3,231,173**	**12,929,335**	**31,103,961**	**21,872,882**	**22,579,594**	**15,018,343**
Costos Totales de Operación	**3,439,206**	**10,117,658**	**18,441,648**	**29,630,044**	**17,788,272**	**15,210,186**
Ganancia/Pérdida Total	**-208,033**	**2,811,677**	**12,662,313**	**-7,757,162**	**4,791,322**	**-191,843**

En cuanto a la tasa de cambio promedio utilizada, se tienen los siguientes valores:
En 2006 1 EUR = 14.0572 MXN
En 2007 1 EUR = 15.0723 MXN
En 2008 1 EUR = 16.3721 MXN
En 2009 1 EUR = 18.9284 MXN
En 2010 1 EUR = 16.7331 MXN
En 2011 1 EUR = 17.4134 MXN[42]

7. Bibliografía

1. SENER. *Mapa de Ruta Tecnológica de CCUS en México*. *SENER* **1,** (2014).
2. Houghton, J. T. (John T. *The physics of atmospheres*. (Cambridge University Press, 2002).
3. Martínes, J. & Fernández, A. *Cambio Climático: Una visión desde México*. *Cambio climático: una visión desde México* (SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, 2004).
4. PNUMA. La Capa de Ozono y las SAO. Available at: http://www.pnuma.org/ozono/curso/pdf/m1.pdf. (Accessed: 11th October 2016)
5. La Tierra registra temperaturas históricas en 2015 | starMedia. Available at: http://noticias.starmedia.com/desastres-naturales/tierra-registra-temperaturas-historicas-en-2015.html.
6. Galán Madruga, D. & Garrido Morales, J. L. Cambio climático. Perspectivas futuras. *Obs. Medioambient.* **15,** 11–18 (2012).
7. Wayne Drash. Yes, climate change made Harvey and Irma worse. *CNN* (2017). Available at: http://edition.cnn.com/2017/09/15/us/climate-change-hurricanes-harvey-and-irma/index.html. (Accessed: 16th November 2017)
8. NASA. Climate Change: Vital Signs of the Planet. (2016). Available at: http://climate.nasa.gov/images-of-change?id=591#591-older-thicker-arctic-sea-ice-declines.
9. National Geographic. Efectos del Calentamiento Global. doi:IPCC, 2007
10. Cambio Climático.org. Efectos del cambio climático. Available at: http://www.cambioclimatico.org/tema/efectos-del-cambio-climatico.
11. UNFCCC. *Kyoto Protocol Reference Manual: On Accounting of Emissions and Assigned Amount*. (2008).
12. Metano Como Fuente Alternativa Energética. 1–19
13. Markets, M. La importancia del metano y las actividades de reducción de sus emisiones. 1–2 (2008).
14. PRTR España. CH4 (Metano). Available at: http://www.prtr-es.es/Metano-776112007.html. (Accessed: 13th December 2016)
15. PRTR España. N2O (Óxido nitroso). Available at: http://www.prtr-es.es/N2O-oxido-nitroso,15592,11,2007.html.
16. Comprender los gases de efecto invernadero. 1–3 (2011).
17. PRTR España. CO2 (Dióxido de carbono). Available at: http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html.
18. US Department of Commerce, NOAA, E. S. R. L. ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network. (2017). Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html. (Accessed: 11th January 2018)
19. Shakhashiri, B. Carbon Dioxide , CO2. *Gen. Chem.* **3,** 2–3 (2008).
20. PRTR España. PFC's (Perfluorocarburos). Available at: http://www.prtr-es.es/PFC-perfluorocarburos,15596,11,2007.html. (Accessed: 13th December 2016)
21. Cabrales, P. Transporte de Gases por Medio de Perfluorocarbonos. *Medigraphic Artemisa* **44,** 119–122 (2006).
22. Intergovernmental Panel On Climate Change. IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001. Available at: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/248.htm. (Accessed: 16th December 2016)
23. PRTR España. HFC's (Hidrofluorocarburos). Available at: http://www.prtr-es.es/HFCs-Hidrofluorocarburos-773112007.html. (Accessed: 13th December 2016)
24. Secretaría del Ozono. *Manual del Protocolo de Montreal Relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono*. (PNUMA, 2006).
25. La Capa de Ozono. 10 (2010). Available at: http://www.trazar.com.pa/technical/cfc/la capa de ozono.pdf. (Accessed: 11th October 2016)
26. PRTR España. SF6 (Hexafluoruro de azufre). Available at: http://www.prtr-es.es/Hexafluoruro-azufre-767112007.html. (Accessed: 13th December 2016)

27. Flores, R., Delgado, F. & Romero, V. Aplicaciones del SF 6 en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente. **16,** 229–241 (2012).
28. Sánchez Cifuentes, A., Herrera Toledo, R. A., Moreno Coronado, T., Salas Cisneros, G. V. & Centeno Rosales, S. P. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010* **53,** (2013).
29. Benavides Ballesteros, H. O. & León Aristizabal, G. E. Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam* 1–102 (2007).
30. Houghton JT *et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis*. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (The Press Syndicate Of The University Of Cambridge, 2001). doi:10.1256/004316502320517344
31. Sigurðardóttir, H. CarbFix - CO2 Fixation into Basalts - Annual Status Report 2010. 21 (2010).
32. Matter, J. M., Stute, M. & Broecker, W. CarbFix CO2 Injection Pilot Project , Iceland. 13 (2009). Available at: http://www.earth.columbia.edu/sitefiles/file/Research/CarbFix_Matter.pdf.
33. Grandia, F., Oelkers, E. & Snaebjornsdottir, S. O. *CarbFix Final Report*. (2014).
34. Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Sigfússon, B., Gunnlaugsson, E. & Júlíusson Már, B. Geothermal Gas Emission From Hellisheiði and Nesjavellir Power Plants , Iceland. *Geotherm. Resour. Counc. Trans. Trans.* **37,** 785–789 (2013).
35. CarbFixProject. *CO2 Fixation into Basalts Hellisheiði Iceland: Annual Status Report 2008 Hólmfríður Sigurðardóttir*. (2008).
36. CarbFixProject. *CO2 Fixation into Basalts Hellisheiði Iceland: Annual Status Report 2009 Hólmfríður Sigurðardóttir*. (2009).
37. Gómez-Tuena, a, Orozco-Esquivel, M. & Ferrari, L. Petrogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. *Boletín la Soc. Geológica Mex.* **LVII,** 227–283 (2005).
38. Struers, E. C. Mineralogía y láminas delgadas - Aplicaciones especiales. (2017). Available at: http://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Special-applications/Mineralogy-and-Thin-sectioning#mineralogy-about. (Accessed: 25th September 2017)
39. Servicio Geológico Mexicano. Difracción de rayos X. (2017). Available at: http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html. (Accessed: 26th September 2017)
40. Wirth, K., Barth, A. & Indiana University - Purdue University. X-Ray Fluorescence (XRF). (2017). Available at: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRF.html. (Accessed: 26th September 2017)
41. Harris, C. D. in *Análisis Químico Cuantitativo* 6 (2004).
42. Euro Peso Histórico | Histórica EUR/MXN - Investing.com México. Available at: https://mx.investing.com/currencies/eur-mxn-historical-data. (Accessed: 1st February 2018)
43. David M. Kipping & David S. Spiegel. Detection of visible light from the darkest world. *RAS, MNRAS 000* 5 (2011).
44. BIOPEDIA. ¿Qué es un bioma? Available at: http://www.biopedia.com/bioma/. (Accessed: 9th January 2017)
45. Ramón Contreras. Rubisco. *La Guía (Biología)* (2013). Available at: http://biologia.laguia2000.com/bioquimica/rubisco. (Accessed: 10th January 2017)
46. MC. Mario Alberto, R. B. Aspectos Elementales en la Nomenclatura de Sustancias Inorgánicas. **1,** 1–49 (2004).
47. The Mineral Diopside. Available at: http://www.minerals.net/mineral/diopside.aspx. (Accessed: 21st November 2017)
48. Wikipedia. Passivation (Chemistry). Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Passivation_(chemistry). (Accessed: 4th April 2017)
49. Nucleation: Crystallography. (2006). Available at: https://global.britannica.com/science/nucleation. (Accessed: 2nd May 2017)
50. Mackenzie, W. S. & Adams, A. E. *Atas en Color de Rocas y Minerales en Lámina Delgada*. (MASSON, S.A., 1997).
51. Introducción a la Mineralogía. Available at: http://greco.fmc.cie.uva.es/mineralogia/contenido/intr_miner2_5_3_1_4.html. (Accessed: 26th

September 2017)
52. © G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Activación Térmica. (2017). Available at: http://www.gunt.de/es/productos/ingenieria-de-procesos/ingenieria-de-procesos-quimicos/activacion-termica/glct-1:pa-150:ca-247. (Accessed: 14th December 2017)

Apéndice

Tlax1.- Análisis petrográfico.

- Textura: porfídica seriada y glomerofídica. Presenta dominios de textura fluidal.
- Matriz: Compuesta de plagioclasas y vidrio basáltico principalmente.

Contiene fenocristales de olivino esqueletales y fracturados, alterados por iddingsita que van de subedrales a euedrales. También contiene fenocristales de augita que van de subedrales a euedrales, con alteración incipiente de iddingsita y fenocristales de enstatita euedrales a subedrales.

En la matriz existen algunas vesículas rellenas de cuarzo y calcita. La roca tiene intersticios de carbonatos y tiene una presencia moderada de óxidos de magnetita.



Figura A 1.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax1.

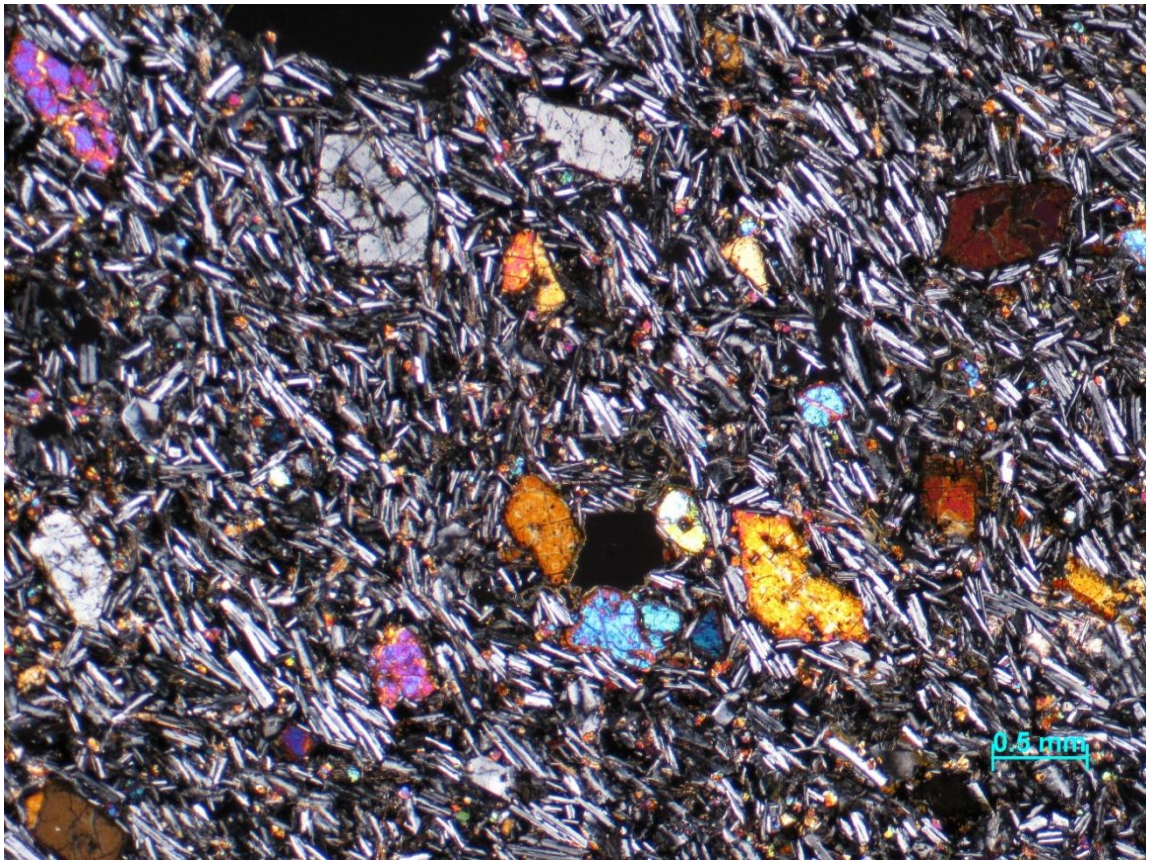


Figura A 2.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax1'.

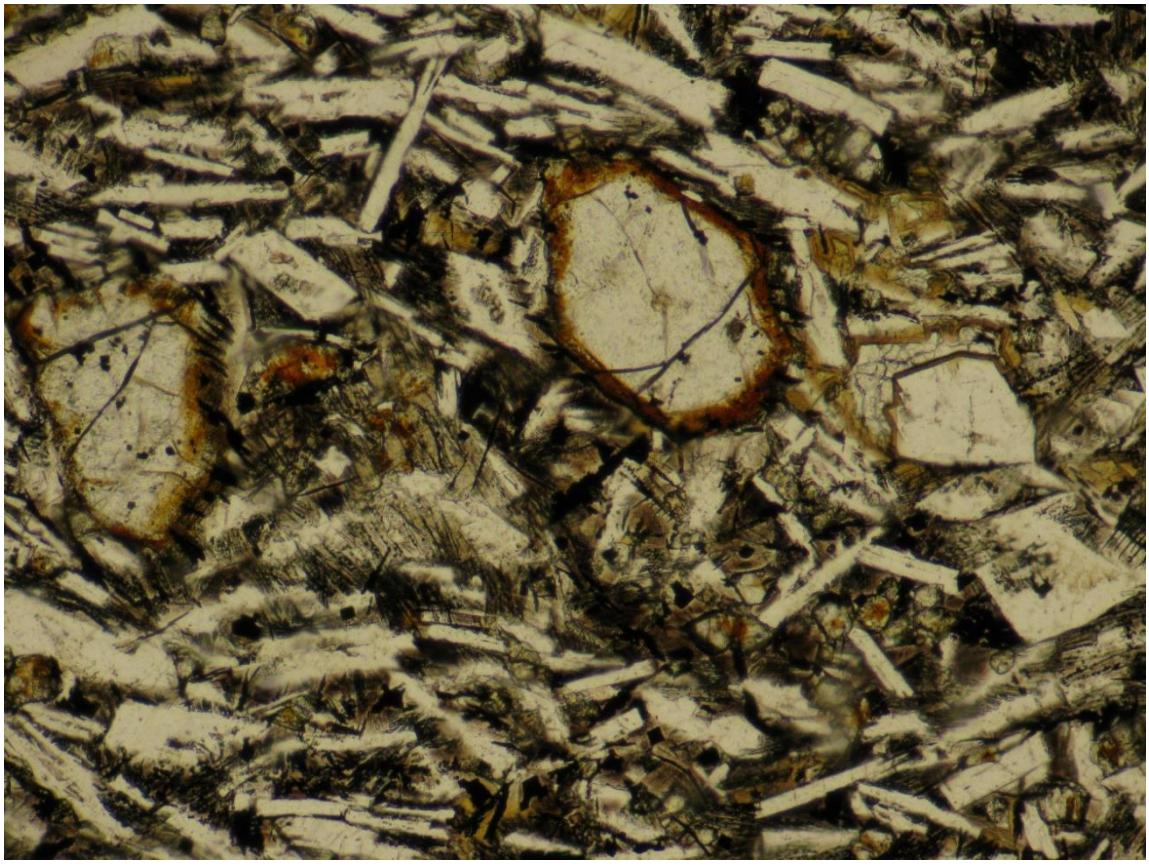


Figura A 3.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles paralelos de la lámina Tlax1'.

Tlax4.- Análisis petrográfico.

- Textura: Porfídica seriada.
- Matriz: De microlitos de plagioclasa y vidrio de composición basáltica.

La roca está compuesta por fenocristales de olivino anedrales y presenta alteración avanzada de iddingsita incipiente, fenocristales de augita anedrales, fenocristales de plagioclasa que van de euedrales a subedrales. Contiene olivino que presenta fracturamiento interno, cristales de augita altamente fracturados con intersticios rellenos de vidrio basáltico y presencia escasa de fenocristales anedrales de enstatita.

La matriz tiene presencia de puntos triples de augita, vidrio basáltico y plagioclasa, tiene intersticios rellenos de vidrio basáltico y micro cristales anedrales de augita y olivino. La roca también presenta óxidos de fierro (magnetita).

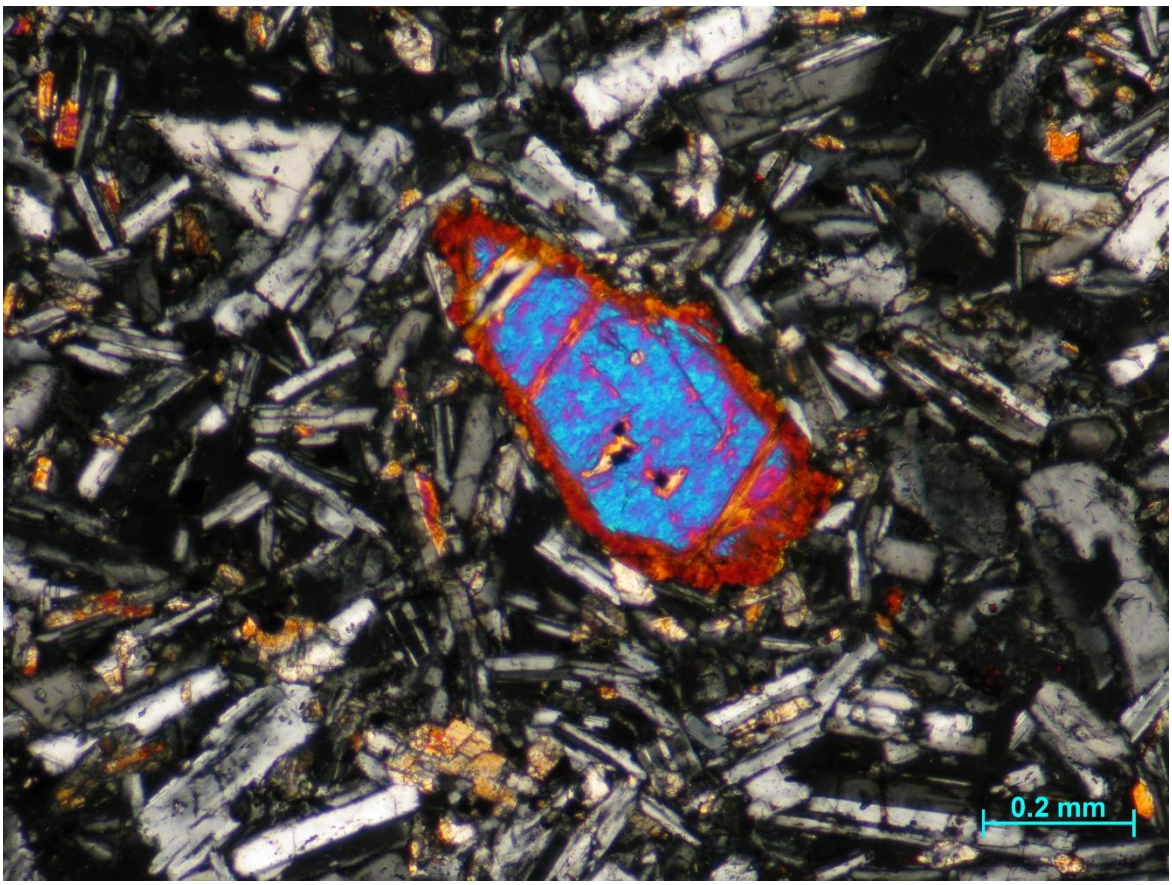


Figura A 4.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles cruzados de la lámina Tlax4.

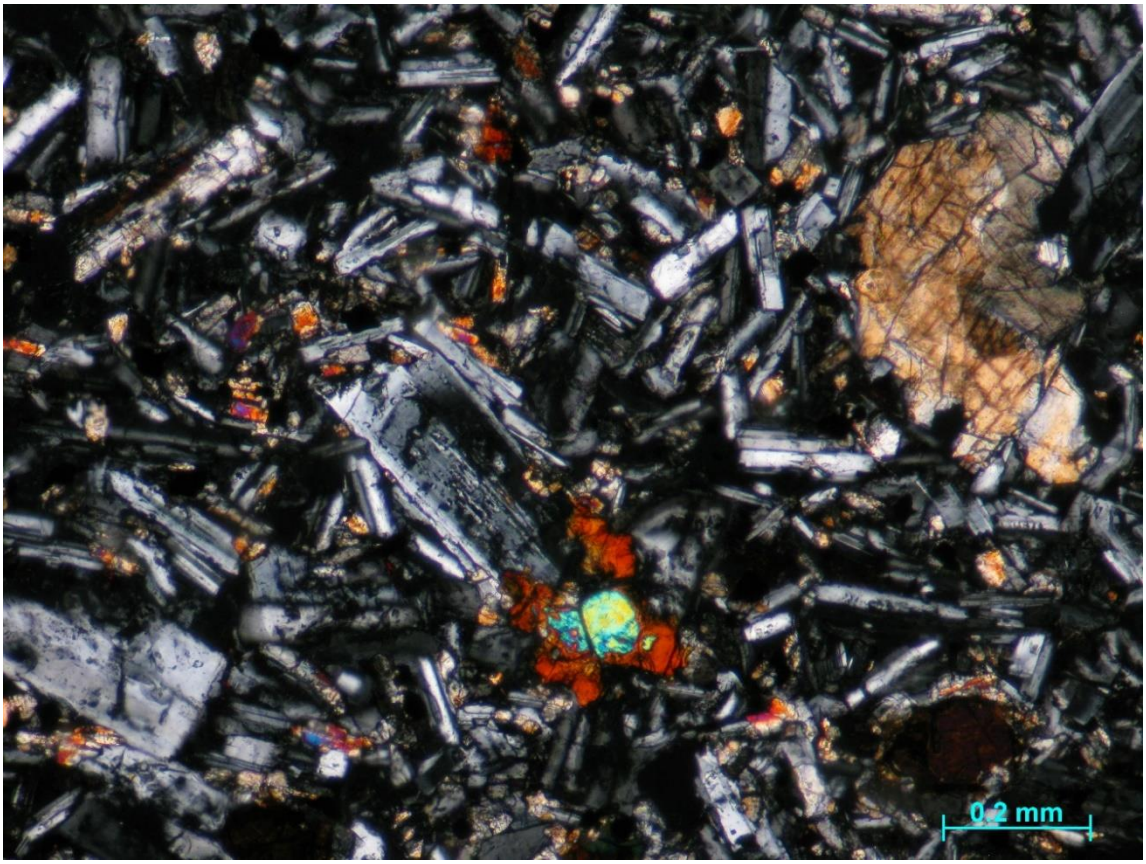


Figura A 5.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles cruzados de la lámina Tlax4'.

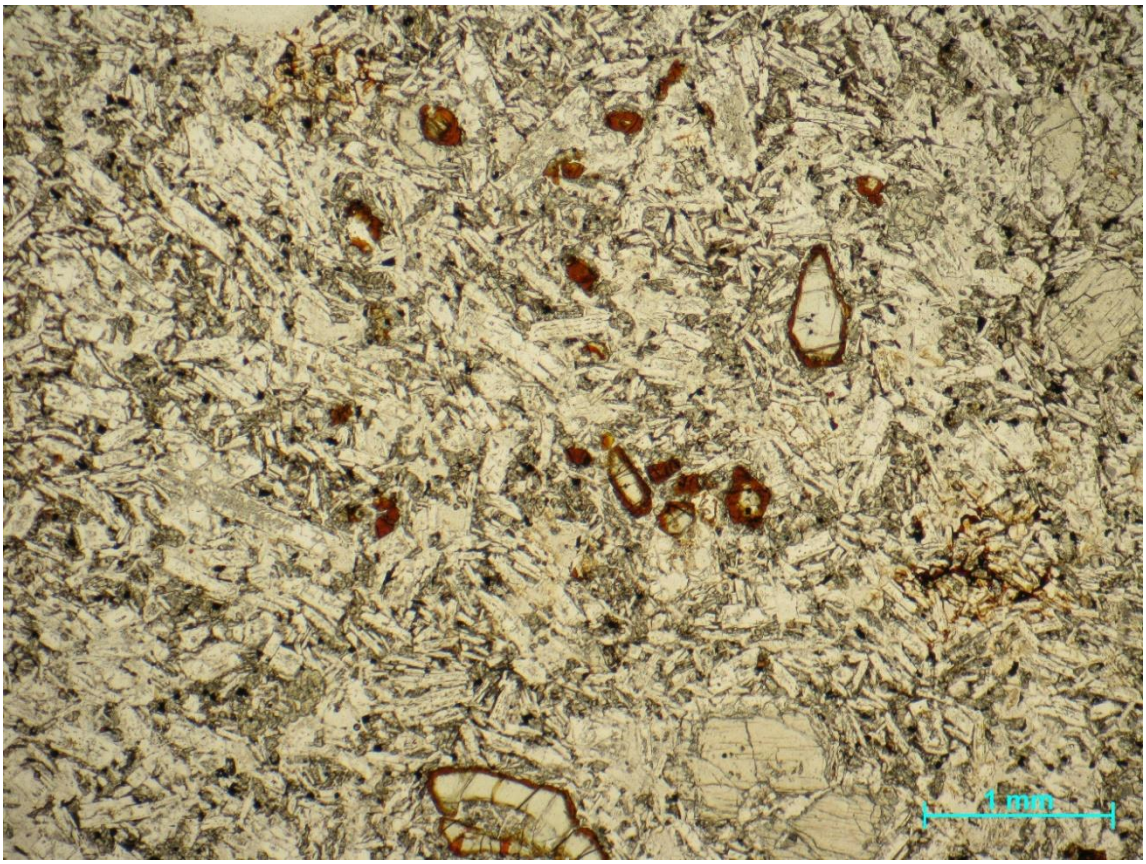


Figura A 6.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles paralelos de la lámina Tlax4.

Tlax6.- Análisis petrográfico.

- Textura: Porfídica bimodal y glomeroporfídica con glomerocristales de plagioclasa, olivino y augita.
- Matriz: Poiquilítica con glomerocristales, dominan microlitos de plagioclasa con distribución aleatoria.

La roca presenta fenocristales subedrales de olivino con alteración incipiente de iddingsita, presenta fracturamiento interno. Tiene fenocristales de augita euedrales a subedrales con uniones triples con cristales de plagioclasa y olivino, fenocristales de enstatita euedrales a subedrales con alteración incipiente de iddingsita y óxidos de Fe al interior de esta y augita con aureolas de alteración también por iddingsita.

La matriz también presenta intersticios rellenos de vidrio basáltico, cristales de olivino y augita con fracturamiento interno, vesículas de vidrio basáltico con micro cristales e olivino, augita y plagioclasa. Contiene fenocristales subedrales de plagioclasa zoneados y presencia abundante de óxidos de Fe.

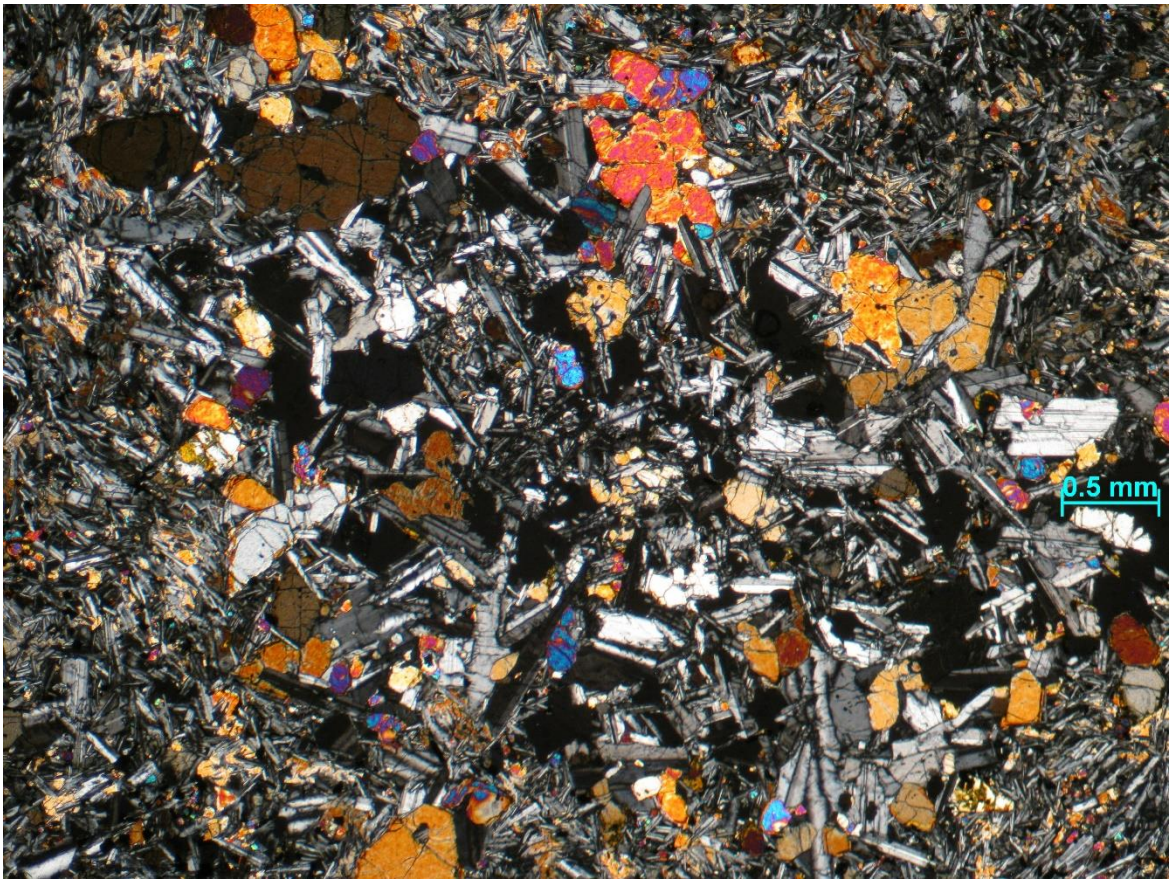


Figura A 7.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax6'.

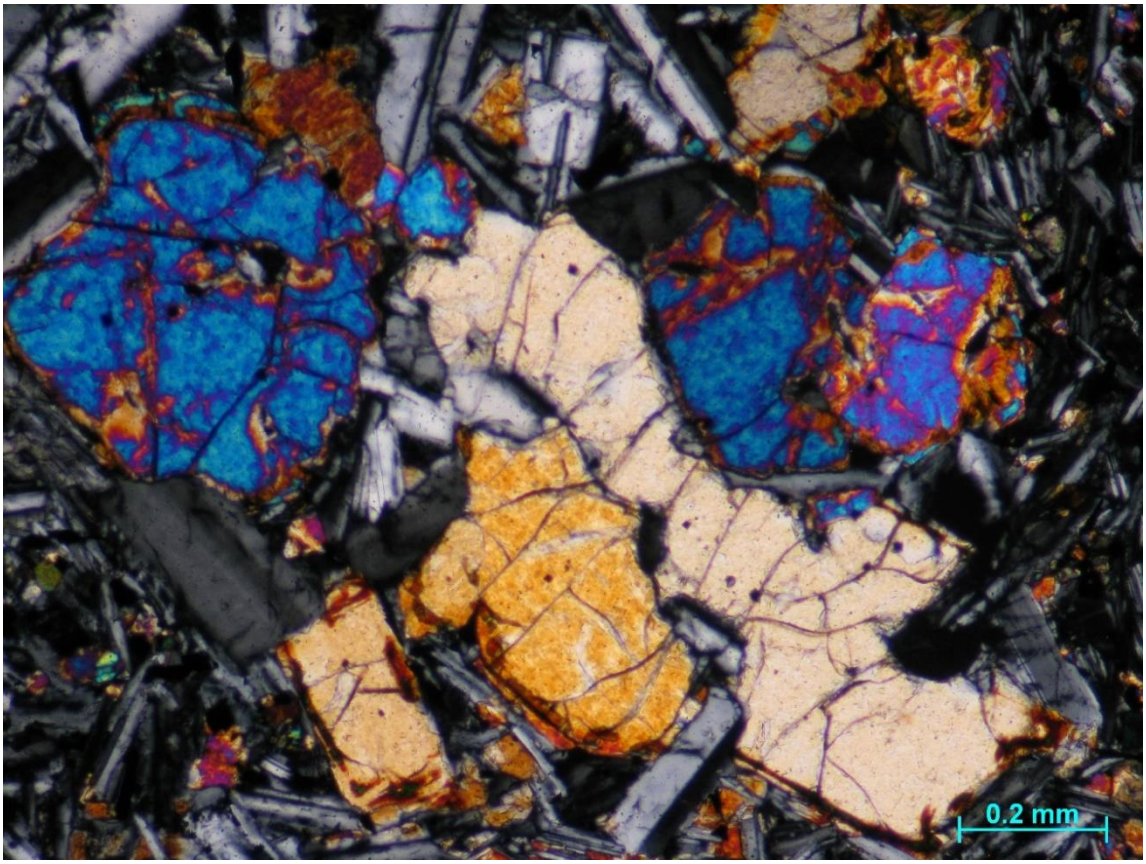


Figura A 8.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles cruzados de la lámina Tlax6.

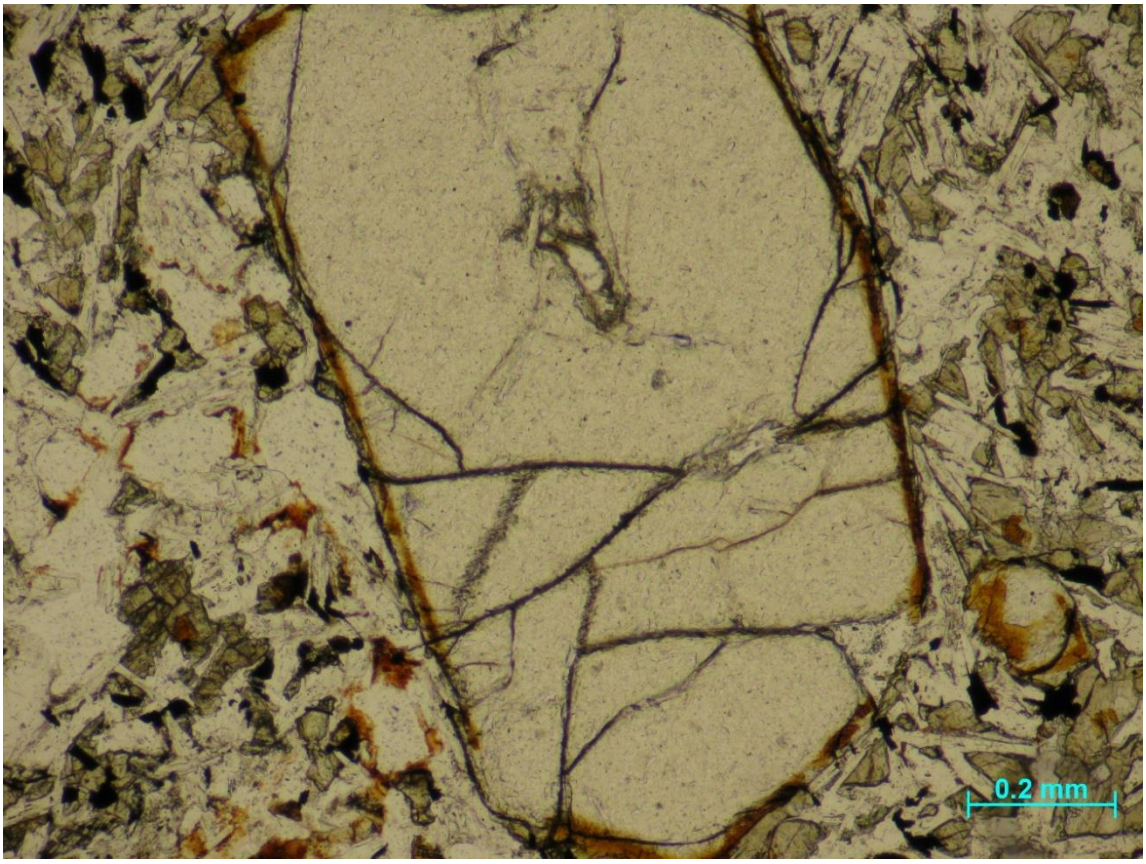


Figura A 9.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles paralelos de la lámina Tlax6.

Tlax7.- Análisis petrográfico.

- Textura: Microlítica.
- Matriz: Compuesta principalmente por microlitos de plagioclasa y micro cristales de augita.

La roca presenta fenocristales de olivino que van de euedrales a subedrales con alteración incipiente a iddingsita con fracturamiento interno, fenocristales de augita euedrales y subedrales con fracturamiento interno, fenocristales de olivino altamente alterados y fenocristales anedrales de cuarzo con borde de reacción, rodeados por micro cristales de augita y plagioclasa que presentan fracturamiento interno.

La matriz presenta vesículas e intersticios rellenos e vidrio basáltico con micro cristales de augita y plagioclasas, además de presencia abundante de óxidos de Fe.

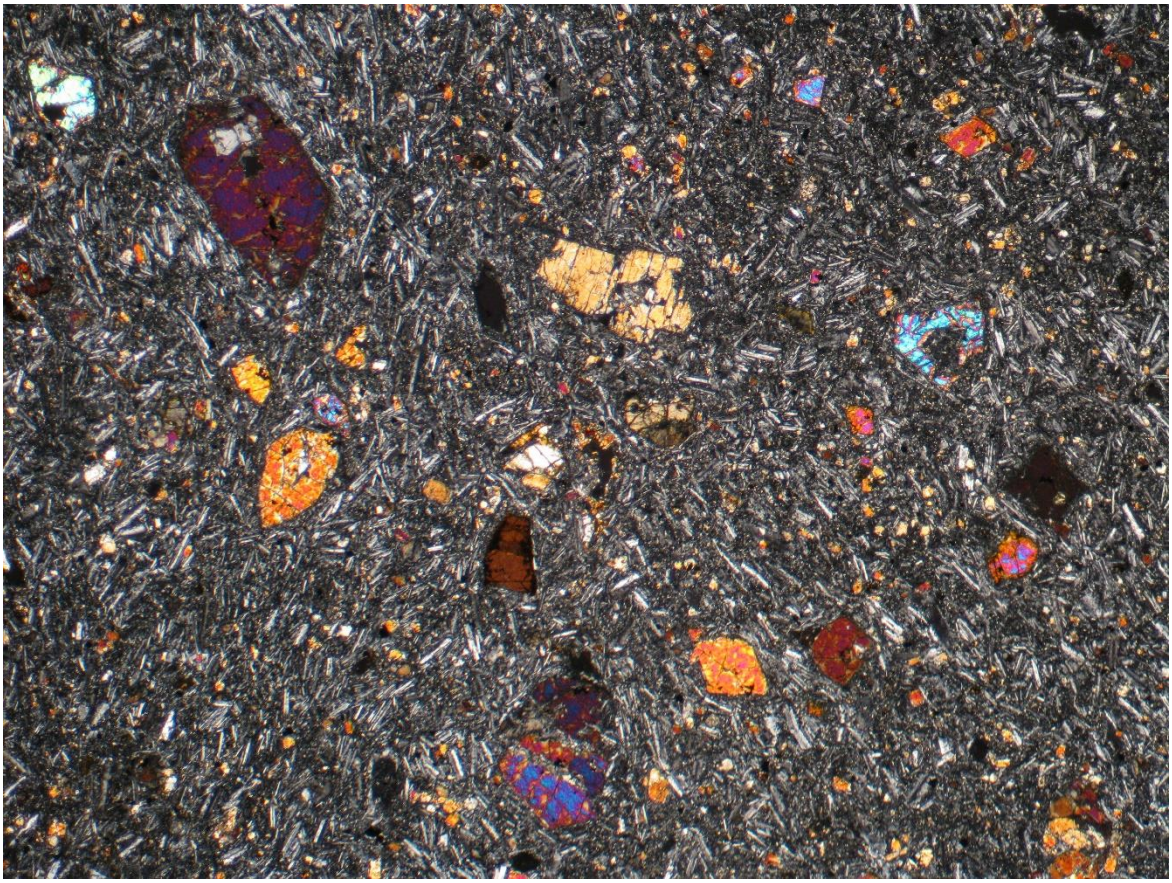


Figura A 10.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax7.



Figura A 11.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 2.5X y nicoles cruzados de la lámina Tlax7'.

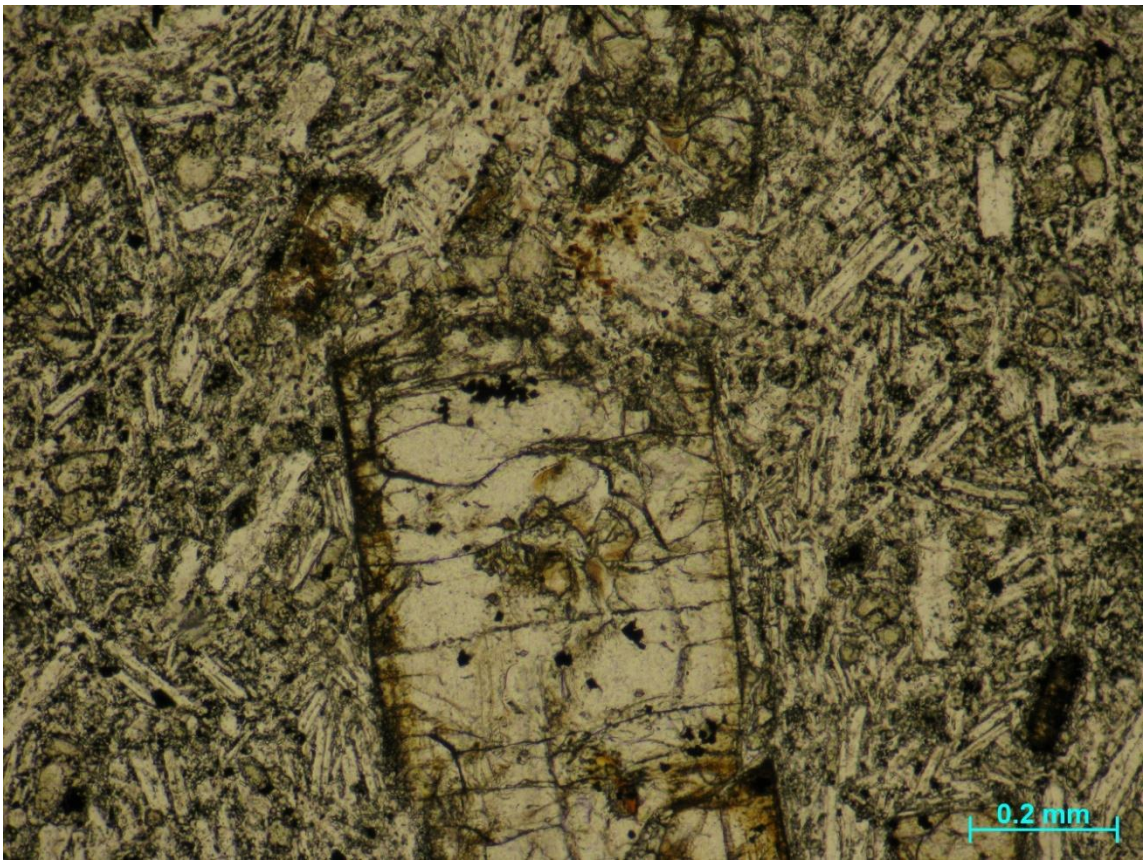
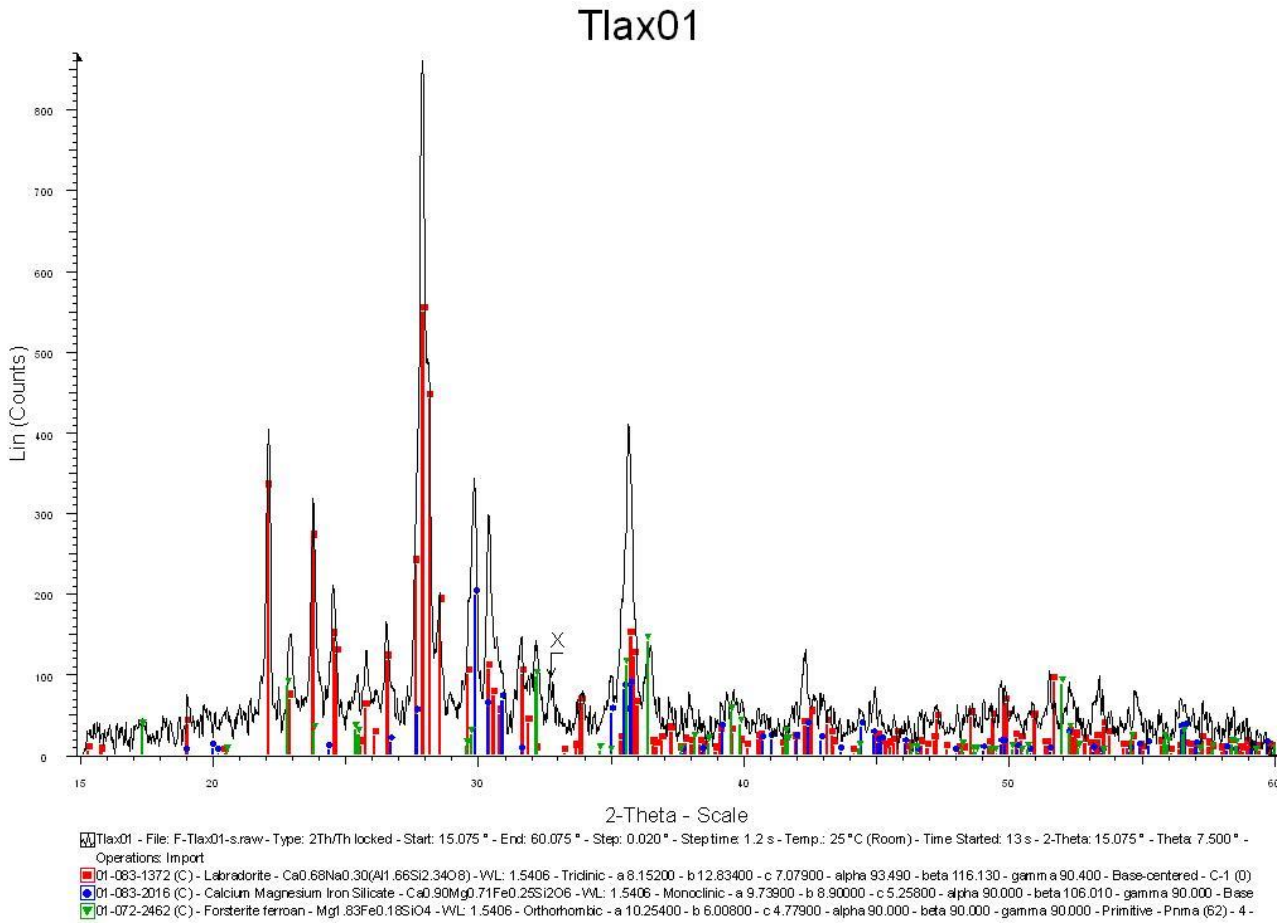


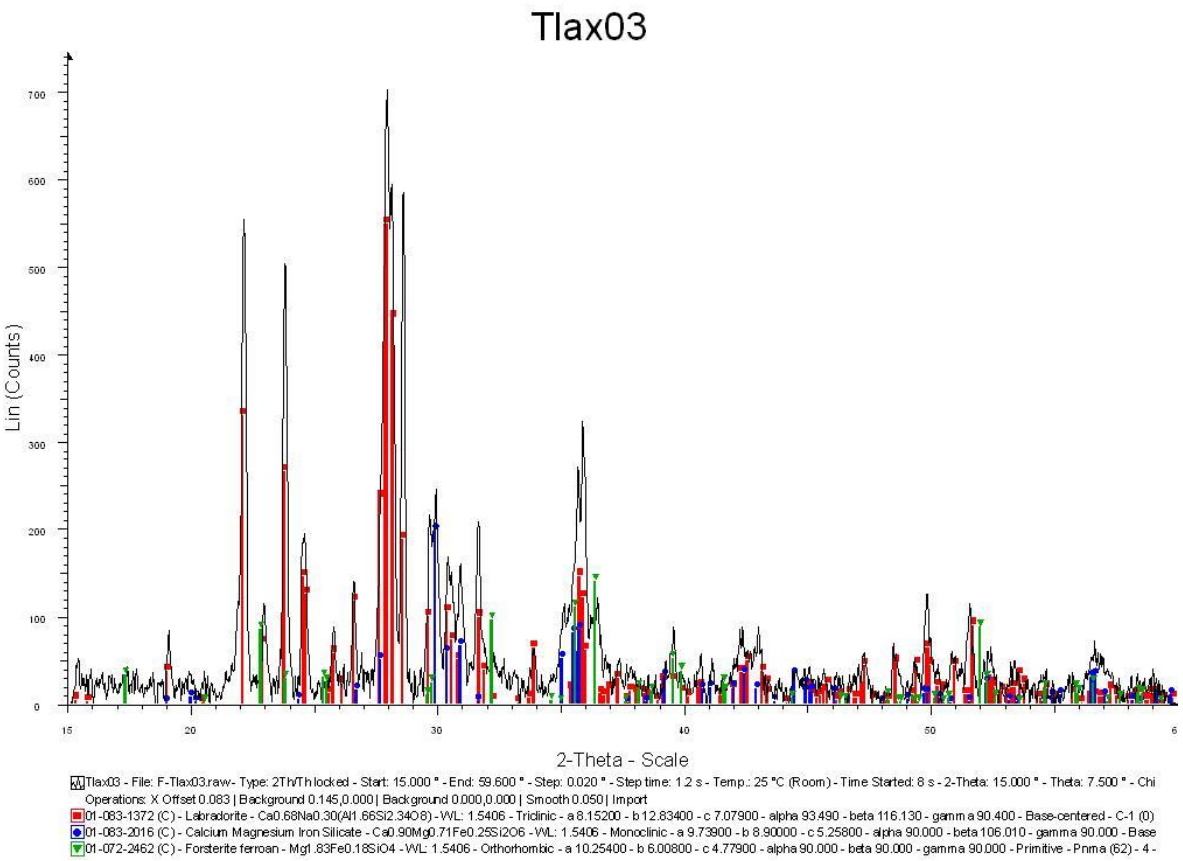
Figura A 12.- Fotografía con microscopio óptico, zoom 10X y nicoles paralelos de la lámina Tlax7.

Tabla A 1.- Composición aproximada de las rocas en porcentaje.

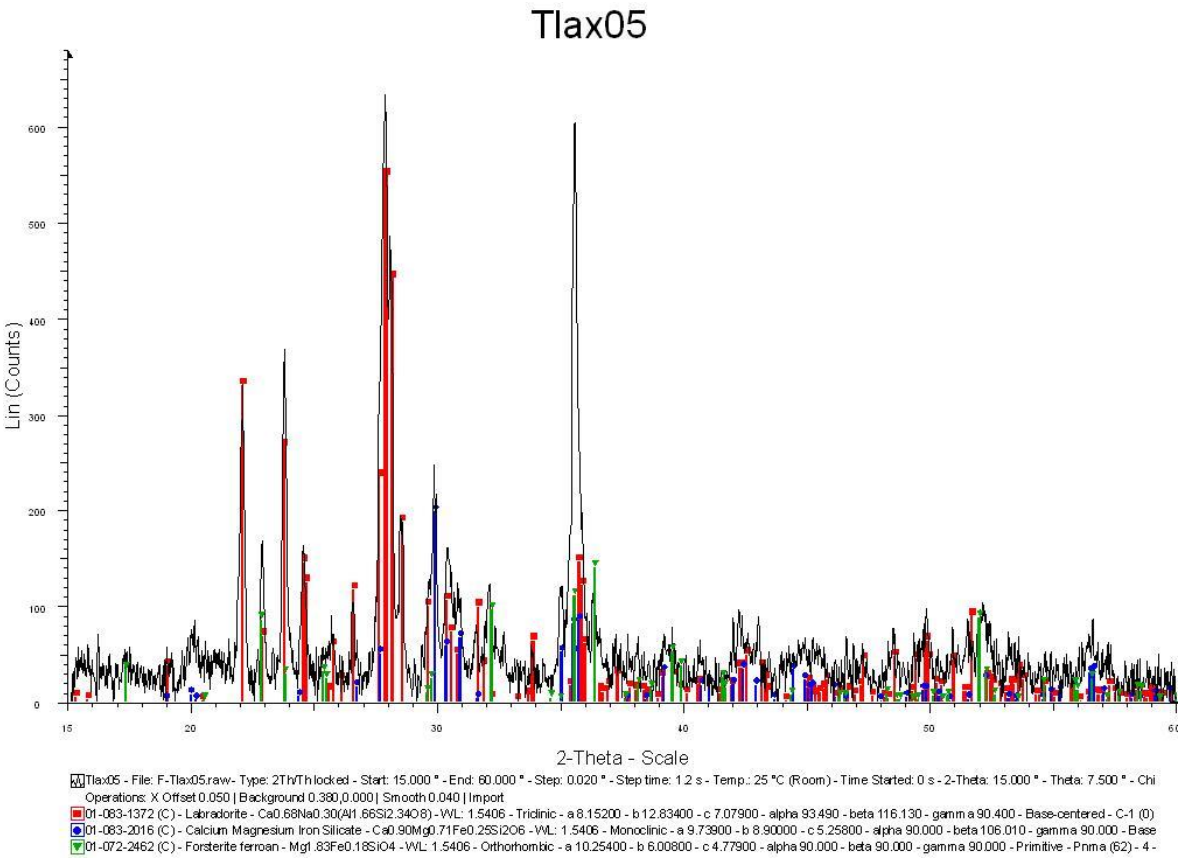
Muestra/Mineral	Olivino %	Augita %	Carbonatos %	Plagioclasas %	Vidrio %	Óxidos de Fe %	Enstatita %
Tlax1	10	10	10	55	10	5	-
Tlax1’	10	15	12	50	8	5	-
Tlax3	8	15	-	65	8	4	-
Tlax3’	5	15	-	70	5	5	-
Tlax4	8	10	-	71	8	3	-
Tlax4’	5	10	-	68	12	5	-
Tlax5	8	20	-	58	6	8	-
Tlax5’	8	25	-	50	5	12	-
Tlax6	8	25	-	52	3	12	-
Tlax6’	10	25	-	45	5	15	-
Tlax7	10	15	-	62	3	7	3
Tlax7’	15	20	-	47	3	10	5



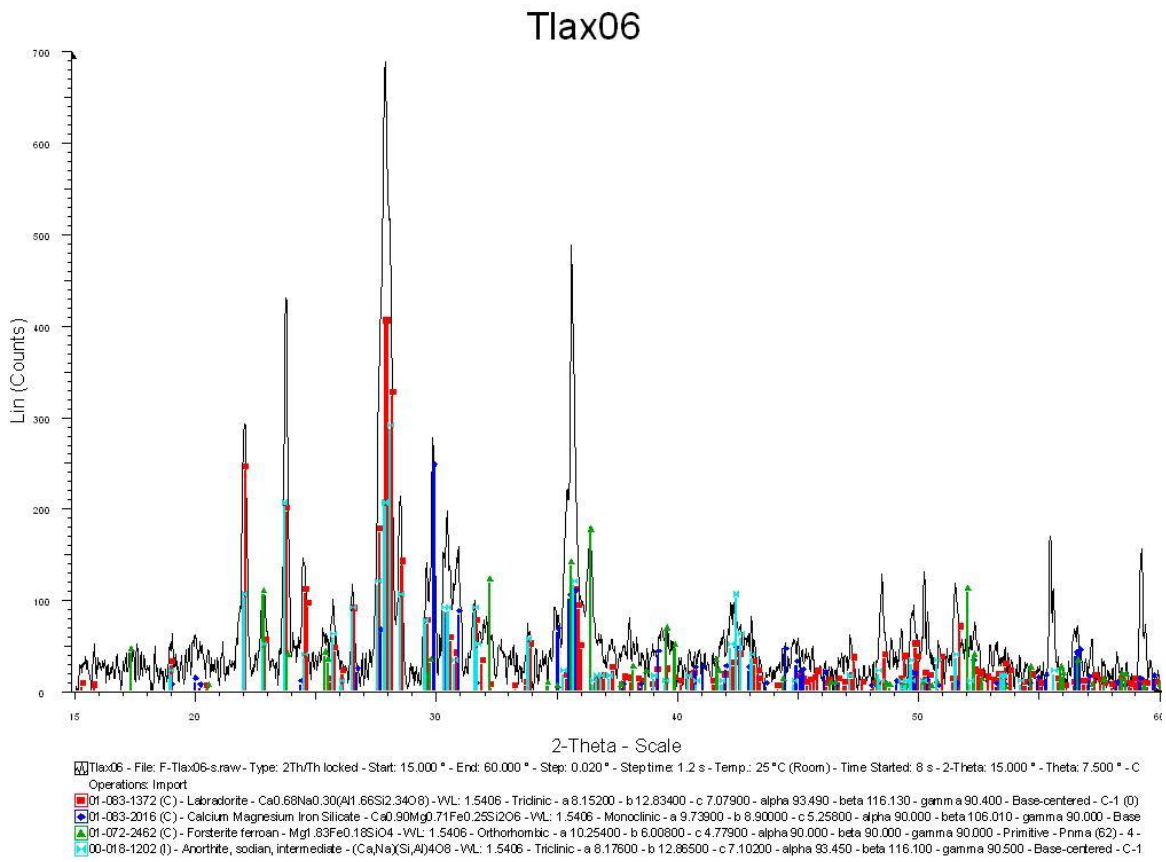
Gráfica A 1.- Difracción de rayos-X de polvos para Tlax-01.



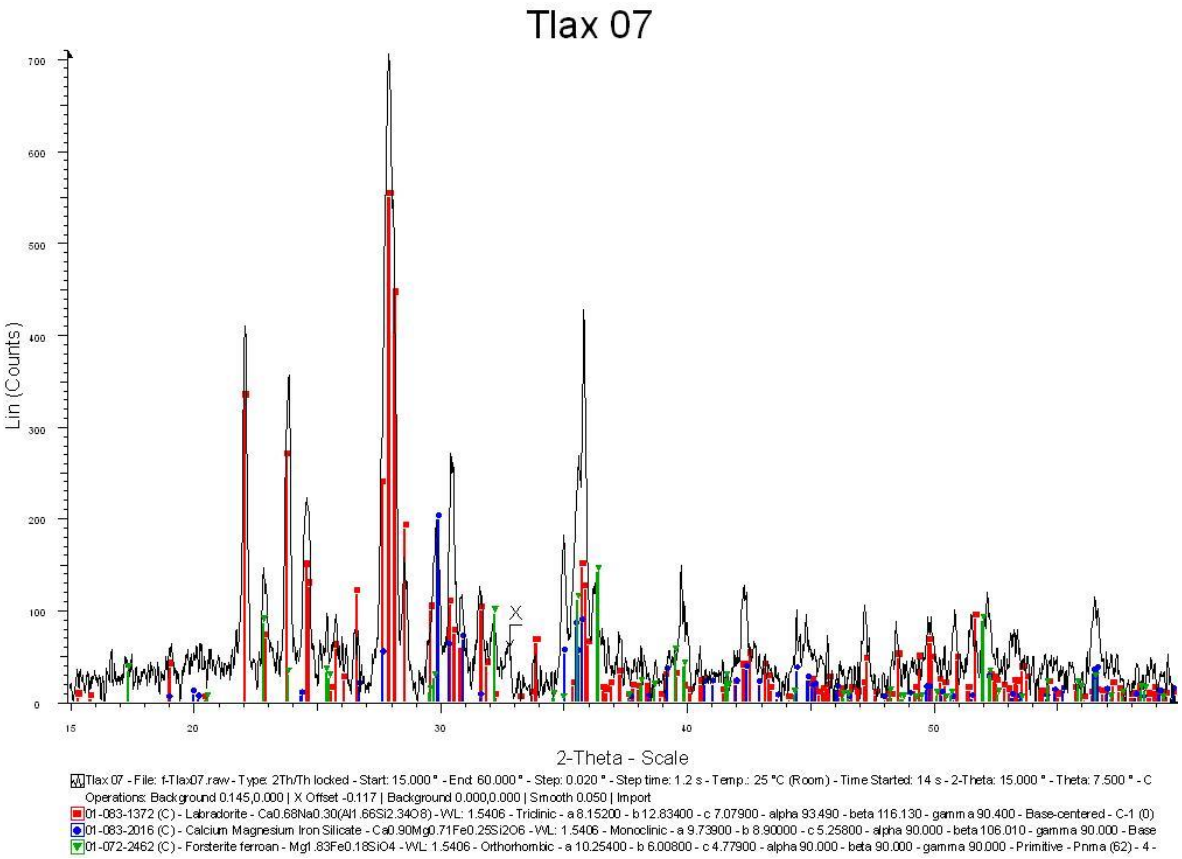
Gráfica A 2.- Difracción de rayos-X de polvos para Tlax-03.



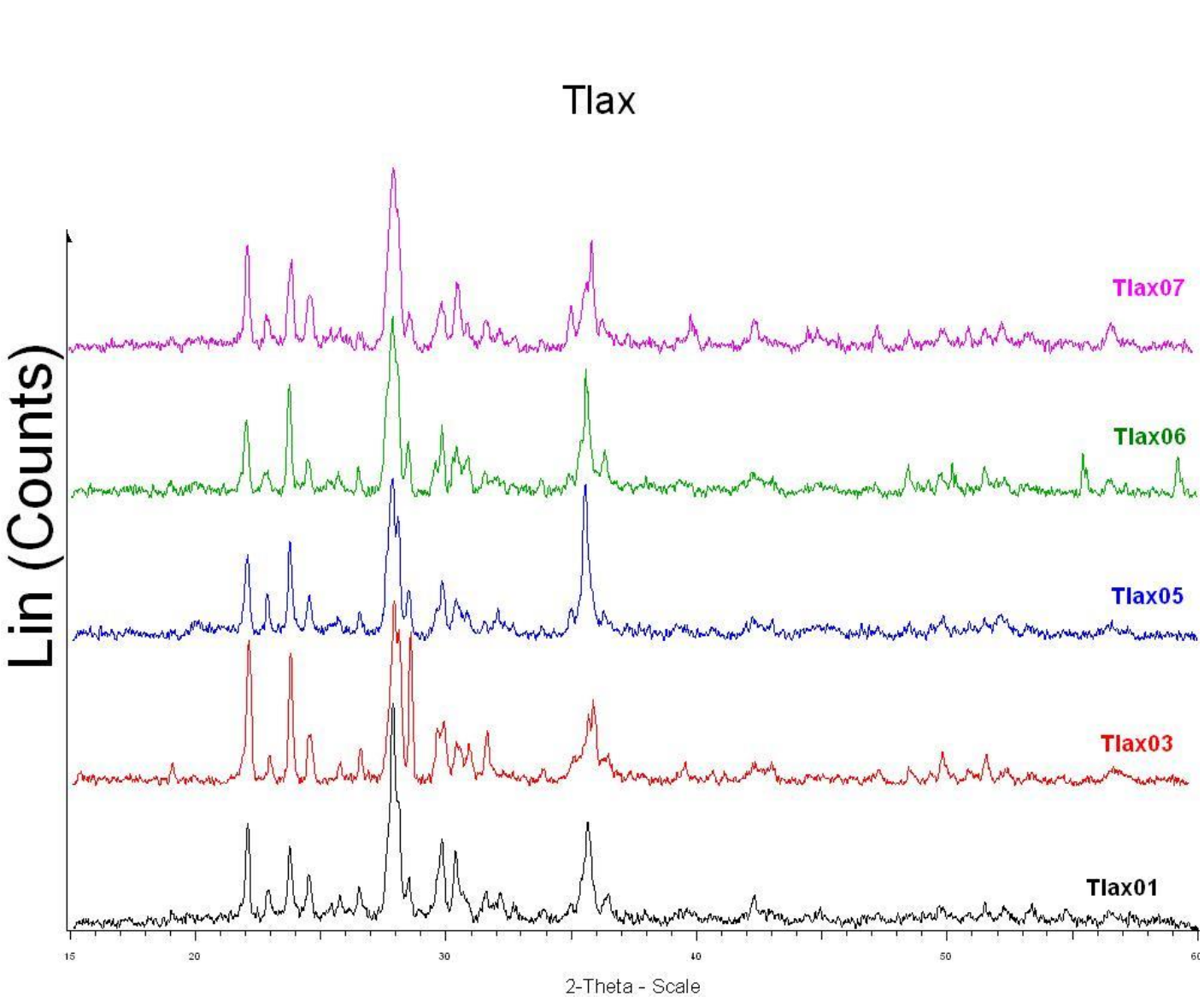
Gráfica A 3.- Difracción de rayos-X de polvos para Tlax-05.



Gráfica A 4.- Difracción de rayos-X de polvos para Tlax-06.



Gráfica A 5.- Difracción de rayos-X de polvos para Tlax-07.



Gráfica A 6.- Comparación de los resultados de difracción de Rayos X de polvo para Tlax-01, Tlax-03, Tlax-05, Tlax-06 y Tlax-07.

Tabla A 2.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-03b.

ID de la muestra:	**Tlax -03b**	
Marca de Tiempo	15 : 41 : 57 2017-08-04	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	51.448	0.0389
Aluminio	15.349	0.1334
Hierro	5.964	0.0115
Magnesio	4.080	0.6410
Calcio	6.841	0.0191
Sodio	3.690	0.9446
#	ID	Resultado %
1	Silicio	51.430
1	Aluminio	15.529
1	Hierro	5.950
1	Magnesio	4.042
1	Calcio	6.821
1	Sodio	4.894
2	Silicio	51.413
2	Aluminio	15.310
2	Hierro	5.964
2	Magnesio	3.314
2	Calcio	6.835
2	Sodio	3.590
3	Silicio	51.503
3	Aluminio	15.210
3	Hierro	5.978
3	Magnesio	4.883
3	Calcio	6.867
3	Sodio	2.587

Tabla A 3.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-03c.

ID de la muestra:	**Tlax -03c**	
Marca de Tiempo	15 : 34 : 19 2017-08-04	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	54.210	0.2028
Aluminio	17.460	0.0782
Hierro	6.150	0.0355
Magnesio	5.524	0.1702
Calcio	7.088	0.0409
Sodio	3.256	1.0680
#	ID	Resultado %
1	Silicio	54.008
1	Aluminio	17.525
1	Hierro	6.200
1	Magnesio	5.765
1	Calcio	7.042
1	Sodio	2.725
2	Silicio	54.134
2	Aluminio	17.506
2	Hierro	6.121
2	Magnesio	5.416
2	Calcio	7.081
2	Sodio	4.746
3	Silicio	54.787
3	Aluminio	17.350
3	Hierro	6.130
3	Magnesio	5.392
3	Calcio	7.142
3	Sodio	2.297

Tabla A 4.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-02.

ID de la muestra:	**Tlax -02**	
Marca de Tiempo	15 : 09 : 47 2017-08-21	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	52.572	0.0923
Aluminio	45.539	0.1388
Hierro	9.523	0.0166
Magnesio	3.19	1.0555
Calcio	7.098	0.0185
Sodio	3.802	0.6487
#	ID	Resultado %
1	Silicio	54.524
1	Aluminio	15.38
1	Hierro	9.543
1	Magnesio	4.024
1	Calcio	7.075
1	Sodio	3.908
2	Silicio	52.701
2	Aluminio	15.718
2	Hierro	9.502
2	Magnesio	1.701
2	Calcio	7.12
2	Sodio	2.959
3	Silicio	52.49
3	Aluminio	15.52
3	Hierro	9.524
3	Magnesio	3.846
3	Calcio	7.1
3	Sodio	4.538

Tabla A 5.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-04.

ID de la muestra:	**Tlax -04**	
Marca de Tiempo	16 : 06 : 16 2017-08-04	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	39.734	0.0294
Aluminio	8.374	0.1733
Hierro	4.696	0.0054
Magnesio	0.050	1.0339
Calcio	4.617	0.0180
Sodio	5.583	0.5639
#	ID	Resultado %
1	Silicio	39.758
1	Aluminio	8.613
1	Hierro	4.689
1	Magnesio	0.379
1	Calcio	4.600
1	Sodio	4.853
2	Silicio	39.752
2	Aluminio	8.304
2	Hierro	4.702
2	Magnesio	1.119
2	Calcio	4.609
2	Sodio	6.226
3	Silicio	39.693
3	Aluminio	8.206
3	Hierro	4.698
3	Magnesio	ND
3	Calcio	4.642
3	Sodio	5.669

Tabla A 6.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-06.

ID de la muestra:	**Tlax -06**	
Marca de Tiempo	15 : 50 : 15 2017-08-04	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	47.503	0.0556
Aluminio	12.205	0.1927
Hierro	6.683	0.0137
Magnesio	4.473	0.6864
Calcio	6.058	0.0093
Sodio	3.824	0.8319
#	ID	Resultado %
1	Silicio	47.461
1	Aluminio	12.020
1	Hierro	6.688
1	Magnesio	5.324
1	Calcio	6.049
1	Sodio	2.907
2	Silicio	47.582
2	Aluminio	12.123
2	Hierro	6.664
2	Magnesio	4.453
2	Calcio	6.070
2	Sodio	3.645
3	Silicio	47.466
3	Aluminio	12.471
3	Hierro	6.696
3	Magnesio	3.643
3	Calcio	6.054
3	Sodio	4.921

Tabla A 7.- Resultados del análisis de fluorescencia de rayos-X para Tlax-06dup.

ID de la muestra:	**Tlax -06dup**	
Marca de Tiempo	16 : 00 : 33 2017-08-04	
Instrumento:	NEX QC S/N QC1161	
Producto:	Rocas	
Medidas:	3	
ID	Promedio %	Desviación Estándar %
Silicio	46.001	0.1252
Aluminio	15.370	0.0275
Hierro	8.189	0.0280
Magnesio	3.750	0.9938
Calcio	7.135	0.0183
Sodio	3.827	1.1314
#	ID	Resultado %
1	Silicio	45.825
1	Aluminio	15.334
1	Hierro	8.151
1	Magnesio	4.349
1	Calcio	7.119
1	Sodio	2.831
2	Silicio	46.079
2	Aluminio	15.374
2	Hierro	8.202
2	Magnesio	2.349
2	Calcio	7.125
2	Sodio	3.958
3	Silicio	46.100
3	Aluminio	15.401
3	Hierro	8.216
3	Magnesio	4.552
3	Calcio	7.160
3	Sodio	5.143

Tabla A 8.- Resultados obtenidos de la prueba de adsorción para la muestra Tlax-03, tanto para la roca como para una parte pulverizada. La adsorción se refiere a la cantidad de gas que la roca puede retener.

Presión	Adsorción	Presión	Adsorción
bar	mmol/g	bar	mmol/g
	Tlax-03 Polvo		Tlax-03 Roca
0.07847	-8.98E-04	0.15022	-1.03E-05
0.15684	-0.00172	0.21851	-0.0015
0.23235	-0.00252	0.24355	-0.00216
0.30696	-0.00324	0.32265	-0.00283
0.37821	-0.00432	0.46967	-0.00347
0.45379	-0.00504	0.5153	-0.00421
0.52796	-0.00548	0.59219	-0.00458
0.59848	-0.00608	0.65246	-0.00559
0.67136	-0.00745	0.7208	-0.00704
0.7391	-0.00756	0.7507	-0.00724
0.79936	-0.00768	0.8923	-0.00727
0.86459	-0.00876	0.90302	-0.00827
0.92379	-0.00931	0.95454	-0.00845
0.96702	0.00268	1.06112	-0.00931
1.0209	-0.00258	1.08063	-0.00616
1.3291	-0.00696	1.3469	-0.00435
1.6324	-0.00608	1.66618	-0.00736
1.9268	-0.00733	1.9622	-0.00368
2.2142	-0.01071	2.30948	-0.00631
2.5057	-0.00713	2.55452	-0.00642
2.8304	-0.002	2.87339	-0.00789
3.1601	-0.00294	3.21592	-0.0078
3.4901	-0.00542	3.51805	-0.00929
3.8132	-0.00932	3.896	-0.0085
4.1333	2.69E-04	4.18294	-0.0095
4.4536	-0.01186	4.52789	-0.00831
4.7684	-0.01012	4.84732	-0.00932
5.0867	-0.0092	5.10948	-0.01987
5.7357	-0.02157	5.77162	-0.02525
6.3768	-0.02729	6.39989	-0.01867
7.0082	-0.02448	7.06967	-0.02353
7.6499	-0.04824	7.72989	-0.03127
8.2735	-0.03891	8.30524	-0.03154
8.9009	-0.04287	8.91802	-0.04822
9.5362	-0.0585	9.62541	-0.05122
10.869	-0.05909	10.93129	-0.05292