

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y
MATEMATICAS
SECCIÓN DE FÍSICA**



TRABAJO DE GRADO:

**“CUANTIFICACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO
GENERADO POR FUENTES MÓVILES EN EL SECTOR
NORTE DEL MERCADO CENTRAL DE SAN MIGUEL”**

PRESENTADO POR:

Flor de María Ortiz

PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN FÍSICA

DOCENTE DIRECTOR:

Licda Gloria Elizabeth Larios de Navarro

San Miguel, El Salvador, Centro América, 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO
RECTOR

MS. D ANA MARIA GLOWER DE ALVARADO
VICE- RECTORA ACADEMICA

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA
SECRETARIA GENERAL

LIC.FRANCISCO CRUZ LETONA
FISCAL GENERAL

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

AUTORIDADES

LIC. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ
DECANO

LIC. CARLOS ALEXANDER DIAZ
VICE-DECANO

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNANDEZ
SECRETARIO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y
MATEMATICA
AUTORIDADES

Mest. JOSÉ ENRY GARCÍA
JEFE DEL DEPTO. DE CC. NN. Y MAT.

LICDA. GLORIA ELIZABETH LARIOS DE NAVARRO
ASESOR DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A MI PADRE CELESTIAL, A NUESTRO SEÑOR JESUCRISTO Y AL ESPÍRITU SANTO

Por haberme dado la guía necesaria, la fortaleza y la sabiduría para poder alcanzar este tan anhelado sueño.

AL LICENCIADO RAFAEL CAYETANO CARTAGENA MARTÍNEZ

Por haberme enseñado a pensar como nadie quiere ni se atreve a hacerlo, sin tener miedo de generar polémica. Con quien he llorado y he reído al mismo tiempo, gracias por haberme dedicado tanto tiempo, por compartir todo su conocimiento conmigo, por haber creído en mí siempre, por ser mi amigo, mi confidente, mi maestro, mi padre algunas veces, ¡MIL GRACIAS MAESTRO!

A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDICIPLINARIA ORIENTAL

Porque más allá del conocimiento académico, en ella adquirí las experiencias que me ayudaron a forjar mi carácter y a ver la vida sin el velo pueril de la inconsciencia, pero más importante que todo, porque en ella aprendí a aprender; y son esas herramientas las que me ayudaron a lo largo de toda mi etapa como estudiante universitario y en el proyecto que por hoy la culmina.

A LOS ASESORES

Licda. Gloria Elizabeth Larios de Navarro y

Lic. Rafael Cayetano Cartagena Martínez

Por facilitar la realización de esta investigación, por haberme brindado los conocimientos necesarios y ayuda incondicional, guiándome y corrigiéndome en la elaboración de este trabajo.

**AL INSTITUTO DE VULCANOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
(IVUES)**

Por haber colaborado en el desarrollo de la investigación, al haber proporcionado el equipo de medición utilizado, lo cual no hubiera sido posible sin la intervención del Lic. Cartagena.

FLOR DE MARÍA ORTIZ

DEDICATORIA

A MI PADRE CELESTIAL Por darme vida y salud, paciencia y sabiduría durante todo el camino que he recorrido.

A mi madre, Rosa Ortiz Hernández Por acompañarme durante todo este camino que no ha sido fácil, todo lo que soy es gracias a ti, tú y tu inquebrantable tenacidad para hacerle frente a la vida, me dieron la motivación y la determinación en todo momento para continuar, gracias por estar ahí conmigo todos los días de mi vida. Con este pequeño paso en mi vida, espero poder retribuirle una pizca de lo que se merece y decirle que ha triunfado una vez más en su vida, ya que todo su esfuerzo no ha sido en vano. Te amo, eres y serás la razón de mí existir.

A mis hermanas, Aimee Johana Ortiz, Diana Emperatriz Ortiz y Mariela Estefany Ortiz Por ser mi inspiración para seguir adelante a pesar de cualquier dificultad, yo seguía por ustedes, por lograr ser un ejemplo como hermana mayor. Todo mi éxito se los dedico a ustedes hermanas mías, las amo y agradezco a Dios por haberme dado la bendición de tenerlas en mi vida y este triunfo es tanto suyo como mío.

A mi abuelo, Bernardo Fuentes (Q.E.P.D) Por enseñarme el valor de la responsabilidad, por inculcarme valores cristianos, Gracias Abuelo por enseñarme la importancia de ir a la escuela y prepararme. El camino no ha sido fácil sin ti pero tu recuerdo me lleno de fuerzas para llegar hasta donde estoy hoy todo es por y para ti y sé que desde donde sea que te encuentres estarás muy orgulloso de mí y de mi logro.

Este trabajo está dedicado a todos los jóvenes que al igual que yo tienen un sueño por cumplir, y que día a día encuentran una razón para continuar en la universidad a pesar de no tener los medios económicos más mínimos para financiar una carrera universitaria. ¡ADELANTE EL CAMINO ES DURO PERO CON LA FE PUESTA EN DIOS TODO ES POSIBLE!

ÍNDICE DEL CONTENIDO

RESUMEN.....xii

INTRODUCCIÓNxiviv

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.3. JUSTIFICACIÓN..... 3

1.4. OBJETIVOS..... 5

1.4.1. Objetivo General..... 5

1.4.2. Objetivos Específicos..... 6

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES 6

1.5.1. Alcances 6

1.5.2. Limitaciones..... 7

CAPÍTULO II: MARCO DE TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... 8

2.1.1 Evolución de los métodos utilizados en el pasado para efectuar la cuantificación de CO₂..... 8

2.1.2 Monitoreo Sobre Calidad de Aire en El Salvador 15

2.1.3 Emisiones de CO₂ en El Salvador 21

2.2 MARCO CONCEPTUAL 22

2.2.1 Composición de la atmósfera..... 23

2.2.2 Contaminación de atmosferas urbanas..... 28

2.2.3	Fuentes de contaminación atmosférica	29
2.2.4	Proceso de combustión	31
2.2.5	Como contamina un vehículo automotor	33
2.2.6	Marco Legal	43
2.2.7	Efecto invernadero	48
2.2.8	Balance energético de la Tierra y transferencia radiativa	65
2.2.9	Dióxido de Carbono: emisiones y tendencia	70
2.3	MARCO METODOLÓGICO.....	75
2.3.1	Espectroscopia infrarroja	76
2.3.2	Espectrometro infrarrojo no dispersivo licor LI-820 (NDIR).....	84
2.3.3	Método de la cámara de acumulación.....	87

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.2	VARIABLES	99
3.2.1	Variable independiente	99
3.2.2	Variable dependiente	99

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO

4.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	100
4.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	101
4.2.1	Nivel de la investigación.....	102
4.3	POBLACIÓN.....	102
4.3.1	Muestra	103
4.4	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN.....	103

4.4.1	Método utilizado para la cuantificación de dióxido de carbono	109
4.4.2	Procedimiento general para la toma de muestras de dióxido de carbono	110
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		
5.1	CONCENTRACIÓN PROMEDIO DIARIA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) EN EL SECTOR NORTE DEL MERCADO CENTRAL DE SAN MIGUEL.....	116
5.2	CONCENTRACIÓN PROMEDIO MENSUAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) EN EL SECTOR NORTE DEL MERCADO CENTRAL DE SAN MIGUEL.....	119
5.3	CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE DIÓXIDO DE CARBONO POR PUNTO DE MUESTREO	119
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	121
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
6.1	CONCLUSIONES	124
6.2	RECOMENDACIONES	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		127
ANEXOS		
ANEXO 1		134
Graficas diarias de la Concentración de dióxido de carbono por punto de muestreo ..		134
ANEXO 2		149
Espectrometro infrarrojo no dispersivo licor li-820		149
Anexo 3.....		150
Especificaciones técnicas del espectrometro infrarrojo licor LI-820		150
GLOSARIO		153

A) ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	153
B) PALABRAS	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Importantes analizadores de CO ₂ históricos, utilizados por cientos de científicos hasta 1961.....	9
Figura 2.2: Curva de keeling (medición de CO ₂ atmosférico medido desde 1957 en observatorio de Mauna Loa, Hawaii).	12
Figura 2.3: Estación central del observatorio de CO ₂ en Mauna Loa.....	14
Figura 2.4: Observatorio orbital 2 del carbono (satelite de la NASA dedicado a la cuantificación de CO ₂ atmosférico)	15
Figura 2.5: Total de emisiones contaminantes atmosféricos en 6 departamentos del país....	19
Figura 2.6: Total de emisiones de contaminantes atmosféricos para el año 2003.....	20
Figura 2.7: Contribucion porcentual de emisiones de CO ₂ por sector a partir de la quema de combustible fosil.....	23
Figura 2.8: Composicion de la atmosfera terrestre.....	29
Figura 2.9: Descripción del funcionamiento del motor de combustión interna.....	39
Figura 2.10: Ciclo termodinámico de un motor de combustión interna.....	39
Figura 2.11: Descripción del funcionamiento del motor diésel.....	41
Figura 2.12: Ciclo termodinámico de un motor diésel.....	41
Figura 2.13: Composición de los gases de escape generados por un motor otto y motor diesel.....	42
Figura 2.14: Esquema radiativo Tierra/Sol.....	54
Figura 2.15: Balance energético de la Tierra.....	56
Figura 2.16: Potenciales de calentamiento global.....	58

Figura 2.17: Dipolos de ls moléculas de H ₂ O, N ₂ O, CO ₂ y CH ₄ en reposo.....	61
Figura 2.18: Modos vibracionales de una molécula poliatómica.....	63
Figura 2.19: Modos de vibración de los atomos de la molécula de CO ₂	65
Figura 2.20: Modos de vibración de los atomos de la molécula de H ₂ O.....	66
Figura 2.21: Modos de vibración de los atomos de la molécula de CH ₄	66
Figura 2.22: Modos de vibración de los atomos de la molécula de O ₃	67
Figura 2.23: Ventana atmosférica entre las bandas de absorción de CO ₂ y H ₂ O.....	69
Figura 2.24: Espectros de absorción de los gases mas importantes del efecto invernadero...70	
Figura 2.25: Ciclo del carbono.....	78
Figura 2.26: Relación de la temperatura y el CO ₂ atmosférico y su evolución durante el ultimo milenio.....	80
Figura 2.27: Cambio en el forzamiento radiativo entre 1750 y 2005 según las estimaciones del IPCC.....	81
Figura 2.28: Región infrarroja del espectro electromagnético.....	84
Figura 2.29: Diagrama simplificado de un espectrometro por transformada de fourier.....	88
Figura 2.30: Diagrama esquematico del sensor dual LI-820.....	92
Figura 2.31: Trayectoria óptica.....	93
Figura 2.32: Técnica de la cámara de acumulación utilizada para medir concentración de CO ₂	96
Figura 4.1: Ubicación geográfica del mercado central de San Miguel y área de estudio seleccionada.....	100
Figura 4.2: Ubicación geografica del sector norte del mercado central de San Miguel.....	101
Figura 4.3. Esquema del espectrometro LICOR LI-820.....	104
Figura 4.4: Esquema de la bomba de aire que bombea el aire hasta el espectrometro.....	105
Figura 4.5: Esquema del computador portátil IPAQ.....	106

Figura 4.6: Cámara de acumulación (a) vista interna (b) vista de perfil.....	107
Figura 4.7: Esquema de la batería.....	108
Figura 4.8: Sistema de la cámara de acumulación como medidor de la concentración y flujo de dióxido de carbono.....	108
Figura 4.9: Recolección de muestras de dióxido de carbono sobre la 2ª calle poniente.....	109
Figura 4.10: Descripción grafica del procedimiento de activación del programa PALMFLUX.....	111-112
Figura 4.11: Detalle general de los datos, curvas y rectas paralelas que se muestran en pantalla una vez iniciado el programa.	113
Figura 4.12: Esquema del proceso de medición de CO ₂ en el suelo, utilizando el sistema de la cámara de acumulación.....	114
Figura 4.13: Curva característica del flujo de CO ₂	115
Figura 5.1: Medida de la concentración promedio diaria de CO ₂ durante el mes de marzo de 2014.....	117
Figura 5.2: Medida de la concentración promedio diaria de CO ₂ durante el mes de abril de 2014.....	117
Figura 5.3: Medida de la concentración promedio diaria de CO ₂ durante el mes de mayo de 2014.....	118
Figura 5.4: Medida de la concentración promedio diaria de CO ₂ durante el mes de junio de 2014.....	118
Figura 5.5: Medida de la concentración promedio mensual de CO ₂ en el sector norte del mercado central de San Miguel.....	119
Figura 5.6: Medida de la concentración promedio de CO ₂ por punto de muestreo sobre la 2ª calle poniente.	120

Figura 5.7: Medida de la concentración promedio de CO ₂ por punto de muestreo sobre la 4a calle poniente.	120
Figura 5.8: Resumen de la concentración promedio de CO ₂ en el sector norte del mercado central de San Miguel.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Recopilación histórica de la cuantificación de CO ₂ en todo el mundo.....	10
Tabla 2.2: Composición del aire.....	25
Tabla 2.3: Parámetros permitidos de los contaminantes del aire y valores máximos permisibles.....	50
Tabla 2.4: Límites máximos para vehículo con motor de encendido por chispa.....	51
Tabla 2.5: Límites máximos permisibles para vehículos con motor diésel.....	52

RESUMEN

Con la presente investigación se pretende iniciar un registro de la contaminación por dióxido de carbono a la atmósfera por fuentes móviles en algunos sitios de mayor circulación vehicular en el centro de la ciudad de San Miguel, para ello se midieron las concentraciones de dióxido de carbono en el aire en contacto con el pavimento que recibe los gases expulsados por los vehículos que circulan sobre la 2ª calle poniente y 4ª calle poniente, en las horas pico de los días laborales durante los meses de marzo, abril, mayo y junio de 2014.

La medición de la concentración de dióxido de carbono se efectuó utilizando un espectrómetro infrarrojo no dispersivo licor LI-820, cuyo funcionamiento, operación y aplicación en este trabajo se describen exhaustivamente. Las muestras se obtuvieron con la técnica de la cámara de acumulación que se utiliza en investigaciones vulcanológicas.

Los valores obtenidos en las mediciones del CO₂ emitido por las fuentes móviles sobrepasaron el valor obtenido de una muestra blanco en ausencia de fuentes móviles, medida en el campus de Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador. El mes con mayor emisión de dióxido de carbono es junio con un valor promedio mensual de 720 ppm, seguido por marzo con 672 ppm. En cuanto al análisis por punto de muestreo, resulta ser la 2ª calle poniente donde se dan los niveles más altos de concentración de dióxido de carbono, en esta zona se emiten entre 600 y 700 ppm.

Al concluir esta investigación se recomienda ampliar estudios similares en otros sectores de la ciudad y durante más tiempo con la finalidad de obtener mayor información que permita

efectuar un análisis más completo sobre el estado de la contaminación del aire en la ciudad de San Miguel debido a la emisión de dióxido de carbono.

Se recomienda además la actualización de la normativa que actualmente tiene el país para regular las emisiones por fuentes móviles, especialmente con respecto a las emisiones de CO₂

INTRODUCCIÓN

En la primavera del año 2014, por primera vez en la historia moderna, el dióxido de carbono atmosférico, clave del calentamiento global excedió en 400 partes por millón (ppm) en la mayoría de zonas del hemisferio norte. Antes de la Revolución Industrial, las concentraciones de este gas eran de 270 ppm. Estos niveles siguen creciendo, debido sobre todo al uso excesivo de combustibles fósiles (IPCC, 2007).

De acuerdo con el cuarto informe sobre evaluación del cambio climático presentado por el IPCC en 2007, se estima que desde 1970 hasta la actualidad, las emisiones de gases del efecto invernadero han aumentado un 70% mientras que los niveles de dióxido de carbono ha experimentado un incremento de un 80%, además se proyecta que de mantenerse las políticas actuales, las emisiones de gases del efecto invernadero crecerán entre 40 y 110 por ciento de 2000 a 2030, dos terceras partes de estas emisiones vendrán de los países en desarrollo, pero las emisiones per cápita se mantendrán de tres a cuatro veces mayores en los países desarrollados

Según expertos, si se continúa lanzando emisiones como hasta ahora con actividades como la quema de combustibles fósiles, las concentraciones podrían alcanzar las 750 ppm al final del siglo. De ser así, se prevé un aumento de la temperatura media mundial de hasta 4°C o más (Turn down the heat: why a 4°C Warner World must be avoided, 2012).

Ante esta problemática se han celebrado una serie de convenciones mundiales por parte de Naciones Unidas y otros organismos internacionales con el fin de crear alianzas con los países desarrollados para encontrar alternativas a la problemática de emisión de gases contaminantes, y poder así lograr reducir la tasa promedio de emisiones a nivel mundial.

Entre los acuerdos más importantes que se han llevado a cabo se puede mencionar el Protocolo de Kioto, el cual es un acuerdo internacional cuyo objetivo consistía en reducir al menos en un 5% a nivel mundial la tasa promedio de emisiones de gases con efecto invernadero por un periodo que comprendía entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990.

En El Salvador no existen investigaciones dedicadas específicamente a la cuantificación de CO₂. A lo largo del tiempo diversas instituciones se ha encargado de monitorear la calidad del aire en el país, sin embargo la información presentada por lo general está enfocada a la cuantificación de aquellas sustancias que resultan nocivas para la salud de las personas tales como material particulado y monóxido de carbono, dejando por un lado investigaciones sobre cuantificación de gases con efecto invernadero que también resulta importante debido a las implicaciones que tiene el aumento de la concentración de estos gases en el calentamiento global.

El objetivo de este trabajo es conocer el nivel de contaminación atmosférica debido a la concentración de CO₂ que es producido por fuentes móviles, ya que este gas es uno de los principales responsable del efecto invernadero de origen antropogenico. Además de producir el primer informe sobre cuantificación de gases del efecto invernadero en la ciudad de San Miguel, ya que hasta el momento no se tiene conocimiento de que exista una investigación similar, con este trabajo se estaría dando inicio a la investigación sobre cuantificación de gases efecto invernadero, considerando que en el futuro se puedan efectuar mejores investigaciones sobre el tema y de mayor alcance.

El tipo de estudio que se realizó fue exploratorio de campo, cuantitativo y transversal, ya que se estudió el fenómeno en su ambiente y además no se encontraron investigaciones similares en el área de estudio seleccionada, la investigación es también de naturaleza cuantitativa ya que la recopilación de datos se efectúa en forma directa mediante un instrumento de medición, para este caso es un espectrometro infrarrojo y transversal debido a que el tiempo para efectuar la investigación es limitado, es decir no se le dará seguimiento.

Para efectuar dicha investigación se utilizó un sistema portátil que consiste en un espectrometro infrarrojo no dispersivo que mide la concentración de CO₂ en el ambiente mediante el método de la cámara de acumulación (West System) ambos dispositivos están acoplados a una computadora de mano portátil que recibe y procesa la señal a través de un polinomio de grado 6, basándose en el método de la transformada de Fourier.

La estructura del presente trabajo se encuentra dividida de la siguiente manera:

El Capítulo I describe el planteamiento del problema, enunciado del problema, justificación y presentación de objetivos que se pretenden lograr y que servirán de guía para el desarrollo de la investigación, así como los alcances y limitaciones de la investigación.

El Capítulo II corresponde al marco conceptual, compuesto por el marco histórico donde se aborda de forma breve los métodos de cuantificación de CO₂ que han sido utilizados a lo largo del tiempo, luego se hace un resumen de la situación de la emisión de CO₂ en el país según informes presentados por diversas instituciones, luego sigue el marco teórico o conceptual donde se describen las bases teóricas que están relacionadas con el planteamiento del problema. A continuación este capítulo se complementa con el marco metodológico

donde se describen los principios físicos y las técnicas e instrumentos de medición que se utilizan en la investigación.

El capítulo III, corresponde al diseño de hipótesis y la operacionalización de variables.

El capítulo IV explica el diseño metodológico, describiendo el tipo y área de estudio, la población y muestra, métodos técnicas e instrumentos que se utilizaran para la recolección de muestras de concentración de CO₂ y el plan de tabulación y análisis.

El capítulo V presenta la tabulación, presentación y análisis e interpretación de los datos correspondientes a la concentración de CO₂ que fue medido en el sector norte del mercado central de San Miguel.

El capítulo VI corresponde a la presentación de conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL

PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Existen muchos factores que agudizan la contaminación del aire urbano en el país, entre ellos se puede mencionar la falta del cumplimiento de las leyes y reglamentos que regulan la emisión de gases producidos por fuentes móviles, especialmente gases con efecto invernadero, ya que a pesar de que algunos de ellos no resultan ser nocivos para la salud, tal es el caso del dióxido de carbono, si generan un incremento del efecto invernadero debido al aumento de su concentración en la atmosfera, que es el resultado de la excesiva utilización de combustibles fósiles.

Esta investigación está enfocada principalmente en la cuantificación de las concentraciones del dióxido de carbono que es emitido por las fuentes móviles que circulan específicamente sobre el sector norte del mercado central de San Miguel, el cual está ubicado entre la 1ª av. Sur, la 1ª calle poniente y la 3ª av. Sur y calle chaparrastique y colinda en su mayoría con locales comerciales. Actualmente cuenta con alrededor de 959 puestos sin tener en cuenta la gran cantidad de puestos informales o ventas ambulantes que se encuentran instaladas en las aceras y avenidas del centro urbano.

Existen una serie de factores que propician una mayor emisión de dióxido de carbono en la zona, en primer lugar se observa una gran cantidad de automóviles y diversas fuentes móviles en muy mal estado, con hasta más de 20 años de uso y que por lo tanto generan una mayor emisión de dióxido de carbono. En segundo lugar el lento tráfico vehicular que se genera en horas pico en el sector norte del mercado, el cual es causado por el desorden que provocan los vendedores informales, taxis, buses y microbuses mal estacionados, propiciando la producción de altas concentraciones de dióxido de carbono, condición a la cual están expuestos los peatones y una gran cantidad de comerciantes que laboran diariamente en ese sector, y el problema se hace cada vez más grave debido a que en el país no hay una ley que regule la emisión de dióxido de carbono y otros gases con efecto invernadero por fuentes móviles, a pesar de que El Salvador ha ratificado una serie de acuerdos internacionales donde se ha comprometido a vigilar la emisión de sustancias contaminantes de la atmósfera y agotadoras de la capa de ozono (protocolo de Montreal).

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

Por lo anteriormente descrito se formula el siguiente enunciado del problema el cual servirá como marco de referencia para la realización de la investigación.

“Análisis del estado de la contaminación atmosférica debido a la concentración de Dióxido de Carbono que es emitido por fuentes móviles en el sector norte del mercado central de San Miguel”

1.3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el tema de emisión de gases con efecto invernadero es tomado con poca importancia en los países subdesarrollados que si bien no están obligados a disminuir la emisión de los mismos, tienen la responsabilidad de vigilar para que este tipo de gases no aumenten su concentración especialmente en áreas urbanas que es donde hay una mayor emisión debido a la alta concentración de fuentes móviles.

Entre los factores que han contribuido al incremento en la concentración de gases con efecto invernadero, principalmente del dióxido de carbono están el crecimiento industrial y demográfico. La concentración del dióxido de carbono atmosférico sobrepasó las 400 ppm en abril de 2014, por primera vez en 400,000 años, según datos proporcionados por la administración nacional oceánica y atmosférica, NOAA por sus siglas en inglés.

El estudio del dióxido de carbono (CO_2) es importante debido a que este es el principal protagonista del efecto invernadero antropogénico: sus moléculas tienen una gran capacidad para absorber radiación infrarroja lo cual está causando una alteración en el flujo de energía radiante atmosférica, que trae consigo un aumento de temperatura global que podría traer como consecuencia importantes modificaciones en el clima en un futuro no muy lejano. Actualmente casi el 60% del dióxido de carbono emitido a la atmósfera es producido principalmente por la combustión de derivados de petróleo.

En El Salvador no existen investigaciones sobre cuantificación de CO₂. Los datos estadísticos que existen se refieren a la situación de la calidad del aire y casi siempre provenientes de estudios en la ciudad capital o sus alrededores.

Los únicos documentos o fuentes que muestran información sobre CO₂ están contenidos en los inventarios de gases con efecto invernadero elaborados por el MARN, en los años de 1994, 2003 y 2005. Desde que se elaboraron estos inventarios, no se han presentado documentos relevantes sobre emisiones y calidad de aire que garanticen que se estén cumpliendo los acuerdos pactados por El Salvador en congresos tan importantes tales como el convenio de Viena para la protección de la capa de ozono (ratificado por El Salvador el 2 de octubre de 1992) también se inscribió en el protocolo de Montreal sobre sustancias agotadoras de la capa de ozono en agosto de 2000 y también era uno de los países participantes en el protocolo de Kioto, aprobado por las partes en 1997; ratificado por El Salvador en 1998. El cual entro en vigor el 16 de febrero de 2005, aunque no habían objetivos obligatorios de reducción de emisiones por ser un país menos industrializado (países no anexo 1).

Según estudios efectuados por el Ministerio del Medio Ambiente entre los años 2003 y 2006, se encontró que casi el 70% de la contaminación del aire es debido a la emisión de gases que son producidos por el sector transporte.

Hasta el momento no se ha encontrado evidencia alguna que indique que en la ciudad de San Miguel se ha efectuado algún tipo de medición de CO₂ en el aire

excepto por el informe que emitió el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en 2006 donde se proporciona información sobre la calidad de aire de 6 departamentos del país incluyendo la ciudad de San Miguel. Sin embargo la información presentada no es muy precisa en cuanto a la cuantificación de CO₂.

El propósito de esta investigación es generar información relacionada con la contaminación atmosférica debido a la concentración de dióxido de carbono atmosférico emitido por fuentes móviles en el Sector Norte del mercado central de San Miguel. Además de proporcionar una línea base con respecto a la cuantificación de gases del efecto invernadero en la ciudad de San Miguel, ya que hasta el momento no se tiene conocimiento de que exista una investigación similar.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Contribuir a la generación de información sobre la contaminación atmosférica debido a gases efecto invernadero en la ciudad de San Miguel a partir de la cuantificación de la concentración de dióxido de carbono que es producido por fuentes móviles que circulan sobre el sector norte del mercado central de San Miguel.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar la CO_2 atmosférico producido por fuentes móviles sobre la intersección de la 2da calle poniente y 3ª avenida norte y sobre la 4ta calle poniente, entre la 1ª y 3ª avenida norte, de 11:30 am a 1:00 pm, de lunes a viernes, de marzo a junio de 2014.
- Comparar los valores de concentración de Dióxido de carbono entre los puntos de muestreo establecidos durante el proceso de medición
- Comparar los valores de concentración de CO_2 atmosférico en la zona de estudio con el valor obtenido en el campus de la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1. Alcances

- Promover la investigación científica sobre la cuantificación de gases con efecto invernadero en San Miguel.
- Ofrecer un material de consulta para otros profesionales que en el futuro realicen investigaciones similares.

1.5.2. Limitaciones

- por falta de tiempo y recursos no se podrá efectuar una investigación más completa, es decir que no se podrá efectuar el mismo análisis de cuantificación en otros lugares que han sido identificados como puntos críticos de excesiva emisión de CO₂.
- El hecho de contar con un solo equipo de medición, no permite que se tomen las medidas en forma simultánea en varios lugares.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO DE TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La cuantificación del dióxido de carbono en la atmósfera no es algo nuevo, de hecho existen datos históricos desde 1812 que demuestran que existen investigaciones dedicadas a la cuantificación de CO₂ que se realizaron mucho tiempo antes de la revolución industrial. Son aproximadamente 200 años los que han sido dedicados a la cuantificación de CO₂ en el aire, o la fracción molar seca cómo se maneja en algunas investigaciones, mas sin embargo según el IPCC (2001), las mediciones directas solo son confiables después de 1957, a partir de mediciones de las burbujas de aire atrapadas en el hielo antártico.

2.1.1 Evolución de los métodos utilizados en el pasado para efectuar la cuantificación de CO₂

Tres técnicas populares evolucionaron desde 1812 para medir el contenido de CO₂ del aire (gravimétrico, titrimétrico y volumétrico o manométrico). El método titrimétrico de Pettenkofer siendo simple, rápido y bien entendido fue usado como el óptimo método estándar durante más de 100 años después de 1857. Los diferentes científicos calibran sus métodos contra los de los demás, haciendo muestras de gas con un contenido conocido de CO₂.

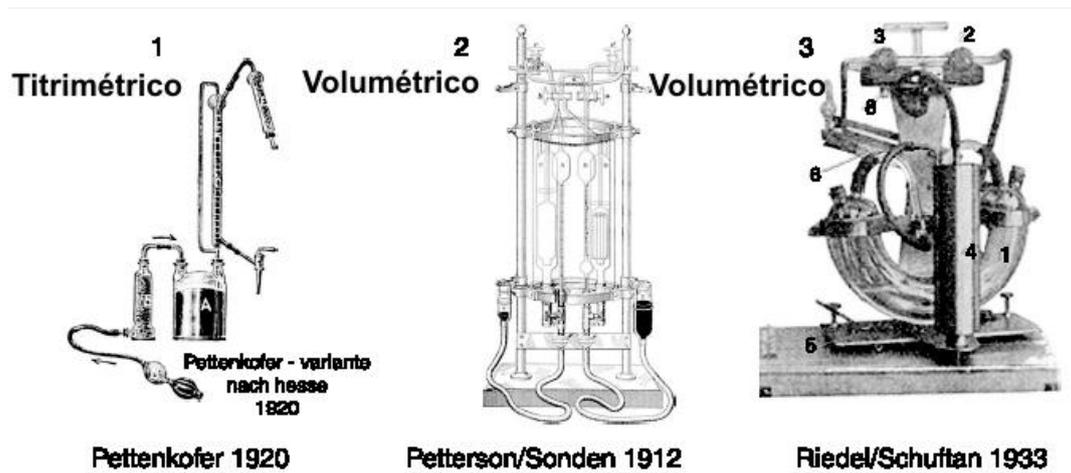


Figura 2.1. Importantes analizadores de gas históricos utilizados por cientos de científicos hasta 1961. Fuente: *180 años de análisis del CO₂ atmosférico por medio de métodos químicos*. Artículo elaborado por el doctor Ernst- Georg Beck¹

El proceso Pettenkofer y todas sus variantes incluyeron la absorción de un volumen de aire conocido en una solución alcalina ($\text{Ba}(\text{OH})_2$, KOH , NaOH) y titulación con ácido (oxálico, sulfúrico, clorhídrico) del carbonato producido. La precisión básica era ± 0.0006 .

Muchas de las mediciones mostradas en la tabla 2.1 casi nunca son tomadas en cuenta debido a que los métodos que fueron utilizados para efectuar dichas mediciones presentaban ciertas deficiencias sistemáticas y por lo tanto la información recopilada por dichos instrumentos de medición no eran de al todo confiable. Fue hasta 1958, año en que el Dr. Charles David Keeling, de la universidad de San Diego, California (USA) introduce una nueva técnica para una medición más precisa del CO_2 atmosférico, Keeling usó condensación criogénica² de muestra de aire seguida de un análisis espectroscópico NDIR contrastado con un gas de

¹ <http://www.mitosyfraudes.org/Calen6/Beck.html>

² Condensación criogénica: es un proceso que se basa en el enfriamiento a temperaturas extremadamente bajas del aire a tratar, mediante nitrógeno líquido u otro fluido criogénico. El aire contaminado se enfría progresivamente en los contenedores, por debajo de su punto de rocío, produciéndose la condensación de los COV (compuestos org. volátiles) y su separación de la fase gas

referencia, usando calibración manométrica. En consecuencia, esta técnica fue adoptada como un estándar analítico para la determinación del CO₂ en todo el mundo, incluyendo a la Asociación Meteorológica Mundial (AMM).

Tabla 2.1. Recopilación histórica de la cuantificación de CO₂ en todo el mundo

No.	Año	Autor	Localidad	Cantidad de mediciones
1	Desde 1855	V Pettenkofer	Múnich (Alemania)	muchas
2	1856 (6 meses)	Gilm Innsbruck	Austria	19
3	1863-64	Schulze	Rostock (Alem)	426
4	1864-65	Smith	Londres; Manchester	246
5	1868-71	Schulze	Rostock (Alem)	1600
6	1872.73	Resiset	Dieppe (Fran)	92
7	1873	Truchot	Clermont Ferrand (Fr)	60
8	1874-75	Frasky	Tabor; Böhmen (Cz)	295
9	1874-75	Hasselbarth	Dahme (Alem)	347
10	1897-80	Reiset	Dieppe (Fr)	118
11	1883	Spring	Lieja (Bel)	266
12	1886-87	Uffelmann	Rostock (Ale)	420
13	1889-91	Petermann	Gembloux (Bel)	525
14	1897-98	Letts & Blake	cerca de Belfast (Irlanda)	64
15	1898-1901	Brown & Escombe	Kew Garden (GB)	92
16	1917-18	Krogh	Copenhague (Din)	muchas
17	1920-26	Lundergardth	sur de Suecia	+3000

18	1928	Krogh/Rehberg	Copenhague (Din)	muchas
19	1932-35	Buch	Atlántico norte/Finlan.	176
20	1936-39	Duerst	Berna (Suiza)	+1000
21	1941-43	Misra	Poona (India)	+250
22	1950	Effenberger	Hamburgo (Ale)	+40
23	1954	Chapman et al.	Ames (Iowa USA)	+100
24	1957	Steinhauser	Viena (Aust)	+500
25	1955-60	Fonseluis Bischof	Escandinavia	3400

Fuente: tabla tomada del artículo científico *180 años del análisis del CO₂ atmosférico mediante métodos químicos*, autor: Ernst Georg Beck

Charles David Keeling, fue la primera persona en efectuar mediciones regulares de las concentraciones de Dióxido de Carbono atmosférico en el Polo Sur y en Hawái desde 1958 en adelante. El valor inicial medido en este entonces era de 316 ppm (partes por millón), ya más del 10% por encima del valor de 280 ppm que se había mantenido casi constante desde fines de la última época de hielo hasta inicios de la revolución industrial. En 1990 la concentración de CO₂ pasó las 350 ppm, nivel máximo permisible para mantener condiciones climáticas parecidas a los de los últimos 12.000 años, según James Hansen y muchos otros científicos.

Las investigaciones de cuantificación de David Keeling se resumen en una sola gráfica, la cual es mejor conocida como la curva de Keeling, que es el resultado de las mediciones continuas tomadas en Mauna Loa (Hawaii) desde 1958. Estas mediciones fueron la primera evidencia de los rápidos incrementos en los niveles de CO₂ en la atmosfera.³

³ Briggs, Helen (1 de diciembre de 2007) *"50 years on: the keeling curve legacy"*. BBC News.

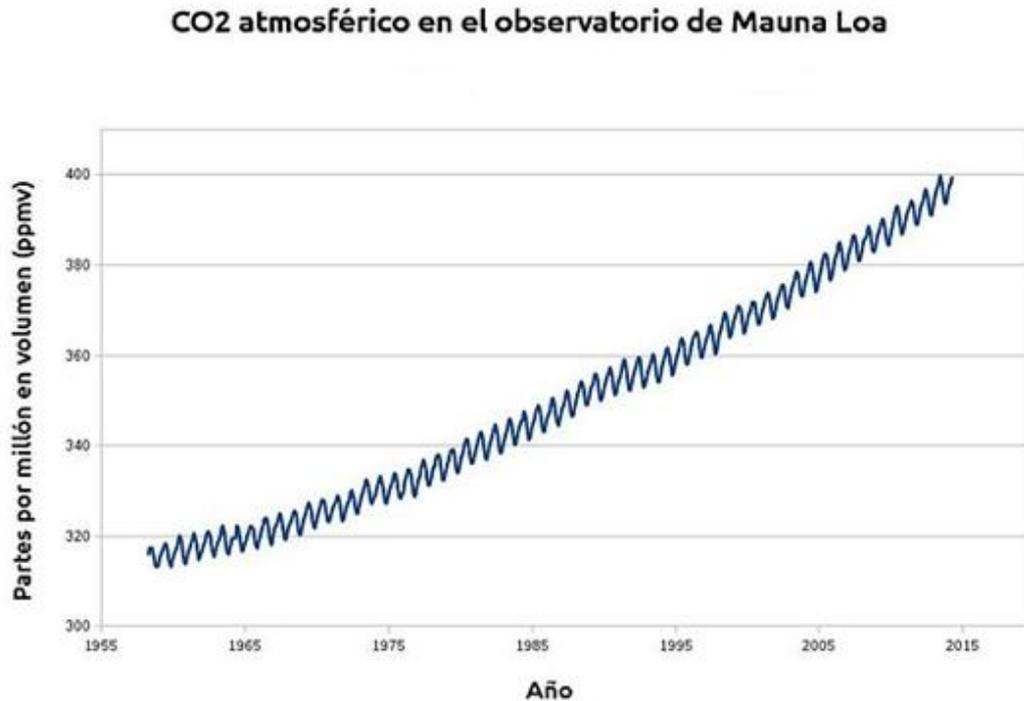


Figura 2.2. Curva de Keeling: concentraciones de CO₂ atmosférico medido en el observatorio Mauna loa (hawai) desde 1958 a abril de 2014. Fuente: trends in Atmospheric carbon dioxide-Mauna Loa. National Oceanic & Atmospheric Administration⁴

Las investigaciones de David Keeling han motivado a la Administración Nacional de la Atmósfera y Océanos mejor conocida por sus siglas en inglés NOAA (USA), la cual inició el programa de monitoreo de CO₂ atmosférico en la década de los 70s y actualmente se efectúan mediciones en unos 100 lugares en todo el mundo.

Medición del CO₂ en Mauna Loa

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) mide el CO₂ en el volcán Mauna Loa (Hawaii), con la seguridad de que esas mediciones reflejan la realidad de la atmósfera global terrestre. La altitud de 3.400 msnm (metros sobre el nivel del mar) es excelente para medir masas de aire, que representan extensiones muy grandes. Con frecuencia se comprueba

⁴ <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

la exactitud, y se comparan con mediciones independientes en el mismo volcán. La diferencia no excede de 0,2 ppm.

En Mauna Loa el analizador de CO₂ consiste en un pequeño cilindro con ventanas planas en ambos extremos. La luz infrarroja entra por una ventana, atraviesa el cilindro, y sale por el otro extremo, donde se encuentra un detector de infrarrojo que mide la luz saliente, el CO₂ absorbe la luz infrarroja. Si hay más CO₂ el cilindro absorbe más luz, y llega menos luz infrarroja al otro extremo del cilindro en donde se halla el detector. La señal del detector se convierte en Voltios y esta es la medida del CO₂ absorbido. En Mauna Loa se mide la fracción molar de CO₂⁵.

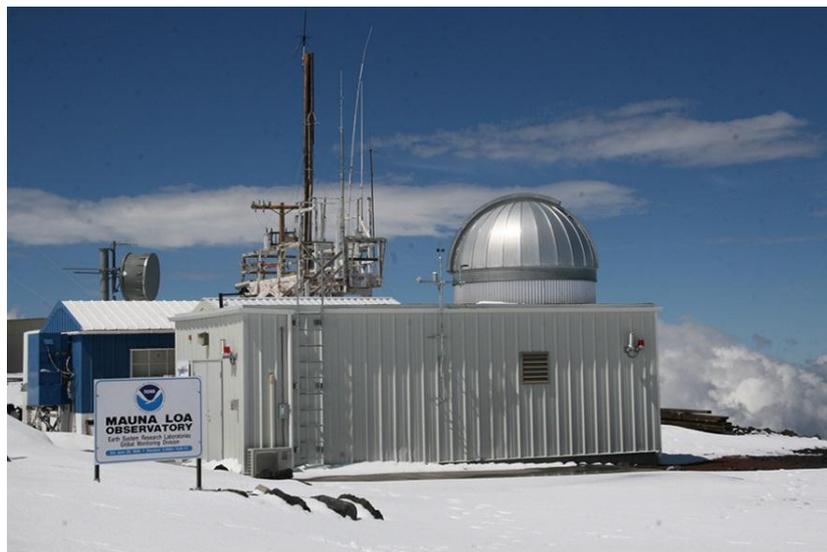


Figura 2.3. Estación central del observatorio ubicado en Mauna loa, dedicado a la cuantificación del CO₂ atmosférico desde 1957 hasta la actualidad. El volcán Mauna Loa, (Hawaii) es el mejor observatorio mundial para medir el aumento incesante del CO₂ atmosférico. Actualmente pertenece al NOAA.

⁵ La fracción molar es el número de moléculas de CO₂ en un número de moléculas de aire, después de retirar el vapor de agua (por ejemplo, 393 ppm de CO₂ en cada millón de moléculas de aire seco).

Actualmente existen mecanismos mucho más precisos y avanzados para el monitoreo de la concentración de Dióxido de Carbono a nivel mundial, tales como el observatorio orbital 2 del carbono (OCO-2), siendo esta la primera nave espacial dedicada al estudio del dióxido de carbono y que fue puesta en órbita exactamente el 2 de julio de 2014. El OCO-2 comenzará una misión que durará como mínimo dos años y que estará destinada a localizar fuentes y lugares de almacenamiento de CO₂ en la Tierra.

El observatorio tomará muestras uniformemente de la atmósfera ubicada por encima del suelo y del agua de la Tierra. Todos los días tomará más de 100.000 mediciones individuales y precisas del Dióxido de Carbono atmosférico. Los científicos usarán estos datos en modelos creados por computadora con el fin de generar mapas de la emisión y de la absorción de Dióxido de Carbono en la superficie de la Tierra a escalas comparables en tamaño con el estado de Colorado. Estos mapas a escala regional proporcionarán nuevas herramientas para localizar e identificar fuentes y sumideros de Dióxido de Carbono.



Figura 2.4. Observatorio Orbital 2 del Carbono (Orbiting Carbon Observatory-2 u OCO-2, en idioma inglés). Fue puesto en órbita el 2 de julio de 2014 y tiene como misión el monitoreo del Dióxido de Carbono a nivel

mundial, su misión durará aproximadamente dos años, tiempo durante el cual proporcionará más de 100.000 mediciones diarias del dióxido de carbono que se concentra en la atmosfera. Fuente: NASA.gov.org

Los datos más recientes sobre los niveles de Dióxido de Carbono a nivel mundial han sido proporcionados por la organización meteorológica mundial (OMM), los datos indican que por primera vez las concentraciones mensuales de dióxido de carbono en la atmosfera superaron el umbral de 400 ppm en todo el hemisferio norte en abril de 2013, lo cual fue catalogado como una concentración record ya que en casi tres millones de años no se habían alcanzado números similares.

2.1.2 Monitoreo Sobre Calidad de Aire en El Salvador

En El Salvador existen datos sobre calidad de aire que datan desde 1970, año en el que el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS), era la institución encargada de poner en marcha la red PANAIRES, que monitoreo durante ocho años las concentraciones de material particulado (MP) en forma de partículas suspendidas (PTS) y de dióxido de azufre (SO_2), los resultados obtenidos llevaron a propuestas de capacitación dirigidas a motoristas de unidades del transporte colectivo, con el objetivo de mejorar la conducción de las unidades y disminuir las emisiones provocadas por este sector.

Fue hasta 1996, con el proyecto Swisscontact, que se retoma el tema de la calidad de aire, estableciéndose la red de monitoreo Swisscontact/ FUSADES (Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social), la cual opero hasta el 2001, posteriormente FUSADES, continuo monitoreando hasta el año 2003, luego lo hizo con la colaboración del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) entre los años 2004-2007. En la actualidad es el MARN la institución encargada de monitorear la calidad de aire en el país.

En 2003 FUSADES realizó el proyecto denominado “Diagnóstico de la calidad de aire, levantamiento de fuentes contaminantes y diseño de red de monitoreo”; del cual se concluyó que 21.26% de las emisiones totales del país se centralizan en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Durante ese año el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social invirtió \$54.84 millones en cubrir las emergencias de enfermedades respiratorias presentadas en los pobladores.

Del diagnóstico efectuado por FUSADES se establecieron 4 zonas de contaminación atmosférica, las cuales son:

- Centro de San Salvador y 3 kilómetros a la redonda;
- Soyapango e Ilopango
- Cuscatancingo hasta Apopa; y
- Santa Ana

Por otro lado, de los contaminantes contabilizados en la AMSS, los que en mayor número se registraron fueron las partículas totales, las partículas menores de 10 micrómetros y las partículas menores de 2.5 micrómetros.

Según este informe se hicieron también monitoreos en Santa Ana, San Miguel y Sonsonate, concluyendo el diagnóstico que en Santa Ana el 84% de las emisiones se produjeron de la cocción doméstica de alimentos, tráfico vehicular, y de los caminos no pavimentados.

En San Miguel el 74% de las emisiones se produjeron de la cocción doméstica de alimentos, tráfico vehicular y de los caminos no pavimentados. Dentro del departamento se contabilizó una fuente fija de contaminación atmosférica que es el ingenio Chaparrastique.

En Sonsonate, el 83% de las emisiones fueron producto de la cocción doméstica de alimentos, ladrilleras/tejas y el tráfico vehicular. El departamento cuenta con el ingenio central de Izalco como la única fuente fija de contaminación atmosférica.

En el año 2006 el MARN elaboró un inventario donde se detalla información de ciertos parámetros específicos de sustancias contaminantes que se consideran de mayor peligro para la salud de la población. Para la elaboración de dicho inventario se tomó como referencias datos del año 2003, los cuales fueron proporcionados por FUSADES, organización que desde el año de 1996 ha efectuado investigaciones sobre la calidad de aire principalmente en la ciudad de San Salvador.

Los parámetros definidos a ser inventariados fueron:

- Partículas suspendidas. PTS.
- Partículas inhalables con diámetro aerodinámico menor a 10 micrones. PM – 10.
- Partículas inhalables con diámetro aerodinámico menor a 25 micrones. PM – 2.5.
- óxidos de nitrógeno, expresados como NO₂, NO_x
- Dióxido de azufre. SO₂
- Monóxido de carbono CO
- Compuestos orgánicos volátiles. COV.
- Dióxido de carbono, CO₂

Según este informe se estima que en el año 2003 se descargaron a nivel nacional 1.25 millones de toneladas de contaminantes que se desglosan en porcentajes por tipo de contaminantes como se muestran en la figura 2.5, donde se observa que el dióxido de carbono es uno de los contaminantes más predominantes a nivel nacional.

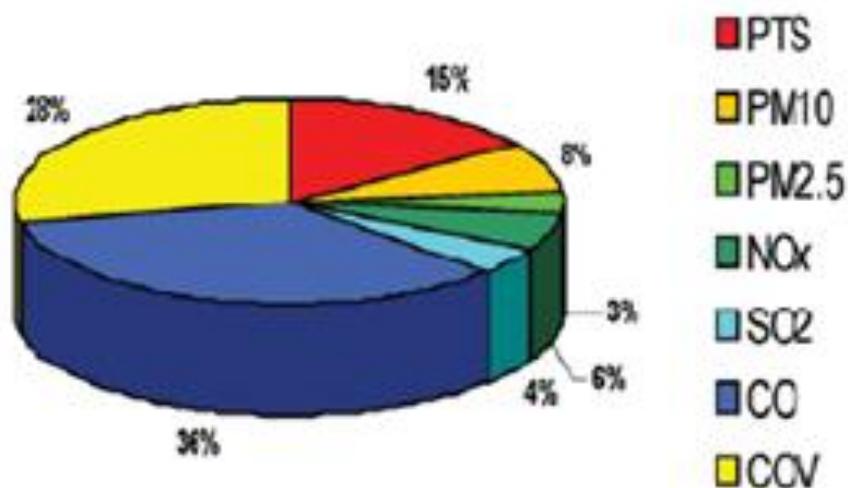


Figura 2.5. Total de emisiones de contaminantes atmosféricos en 6 departamentos del país. Fuente: FUSADES, 2006

Observación del autor de este trabajo de graduación: en la figura 2.5 no aparece el dióxido de carbono, seguramente porque se omitió mencionar que el CO al reaccionar con el oxígeno del aire atmosférico se transforma en CO₂. De la misma manera deberá interpretarse las restantes figuras.

En dicho informe se obtuvieron datos para la zona metropolitana de San Salvador, Santa Ana, San Miguel y Sonsonate (incluyendo Acajutla).

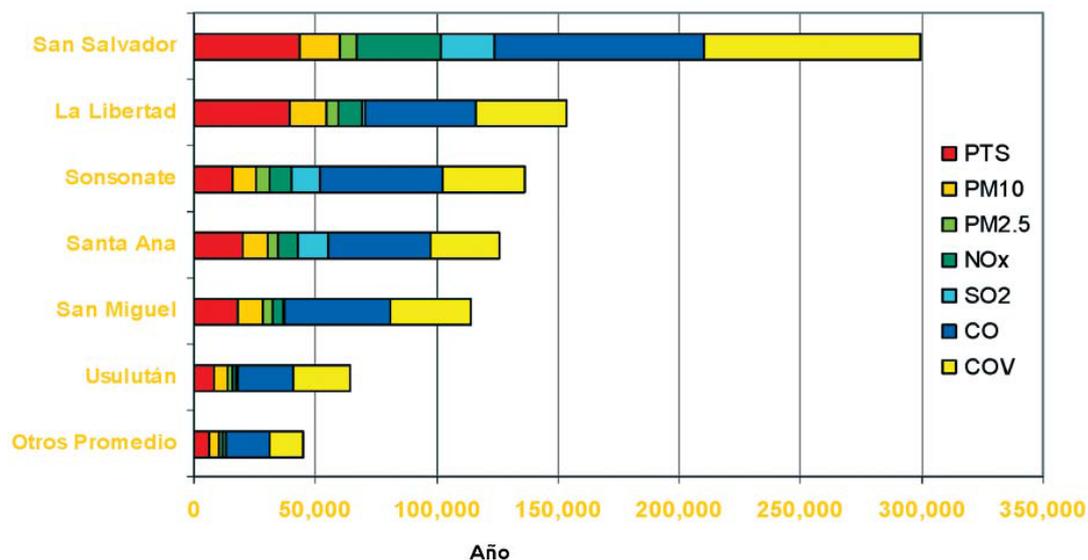


Figura 2.6. Total de emisiones de contaminantes atmosférico para el año 2003, por departamento y por tipo contaminante (FUSADES, 2006).

En la figura 2.6 se observa que los contaminantes predominantes en las áreas urbanas que fueron objeto de estudio son el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV).

Entre las fuentes emisoras que fueron incluidas en dicho inventario están:

- Transporte terrestre
- Transporte aéreo
- Generación termoeléctrica
- Ingenios azucareros
- Quema agrícola
- Industria y comercio entre otros

En cuanto a la metodología utilizada en dicho inventario no se ha dado mayor detalle.

Las fuentes móviles existentes en el país que incluyen los buses, los microbuses y los transportes comerciales y de carga, son los mayores contaminantes de la atmósfera. En el año 2003, estos representaban el 34% de toda la flota vehicular del Gran San Salvador, emitiendo 62% de las emisiones vehiculares totales. El manejo y disposición final de los desechos sólidos se ubica en el segundo factor más contaminante (Inventario de gases de efecto invernadero 2005 – informe narrativo).

Desde el año 2009, el MARN ha colocado 4 puntos de monitoreo automáticos, los cuatro se encuentran ubicados en la Universidad Don Bosco, de Soyapango; la Asamblea Legislativa, Centro de gobierno de San Salvador y en el Comando de Doctrina y Educación Militar (CODEM) al sur de la ciudad de San Salvador: los informes de los últimos años no están disponibles al público.

Los informes de calidad de aire que se efectúan son principalmente dirigidos a la zona metropolitana de San Salvador, Santa Tecla, Soyapango entre otros. De la ciudad de San Miguel aún no se ha concretizado ningún tipo de estudio que revele información sobre la contaminación del aire en zonas urbanas excepto por el inventario de emisiones desarrollado por el MARN a través del subcomponente “apoyo al marco regulatorio de calidad de aire”, del programa de descontaminación de áreas críticas.

A pesar de los esfuerzos por tratar de encontrar información sobre el tema de la cuantificación del dióxido de carbono en la ciudad de San Miguel, aun no se tiene conocimiento de ningún tipo de informe que se haya efectuado con respecto a esta temática, lo cual es preocupante debido a que es evidente la contaminación atmosférica que está

generando el dióxido de carbono emitido por diversas fuentes móviles principalmente en la zona comercial de dicha ciudad.

Según información estadística de la ONU, El Salvador actualmente ocupa el lugar 103 por emisiones de dióxido de carbono de origen antropogénico⁶, haciendo un aporte de aproximadamente 6,305 toneladas métricas anuales que equivale al 0.1% del porcentaje de emisiones de CO₂ a nivel mundial, lo cual no es casi nada comparado con el 15.3% que aporta la unión europea o el 10% de USA. Anteriores registros indican que para el año de 1995, las emisiones de CO₂ en El Salvador representaban alrededor del 3.2% de las emisiones de USA en 1990⁷, porcentaje que no puede ser visto como despreciable y que por lo tanto también hace responsable a países tan pequeños como El Salvador en el aumento de CO₂ de origen antropogénico, que está causando un efecto invernadero intensificado que en el futuro se traducirá en un aumento en la temperatura global del planeta, lo cual traerá consigo graves consecuencias según estudios efectuados por científicos.

2.1.3 Emisiones de CO₂ en El Salvador

Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero elaborado en el 2005, los subsectores responsables de las mayores emisiones de CO₂ son: el subsector transporte (43.90%), la industria energética (26.75%) y el subsector de industria manufacturera y de la construcción que incluye el calor de procesos y la autogeneración (20.6%). Dentro del subsector transporte, las emisiones provienen principalmente del transporte por carretera, mientras que el transporte ferroviario y la aviación nacional participan de manera marginal no

⁶ http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Pa%C3%ADses_por_emisiones_de_di%C3%B3xido_de_carbono

⁷ Informe de la primera comunicación nacional sobre cambio climático 2000, pág. 5

cuantificable. En el subsector manufactura y de la construcción, se estima que el 86% de emisiones provienen del calor para procesos y fuerza motriz, es decir, el proceso productivo, mientras el 14% restante se atribuye a autogeneración (véase figura 2.7).

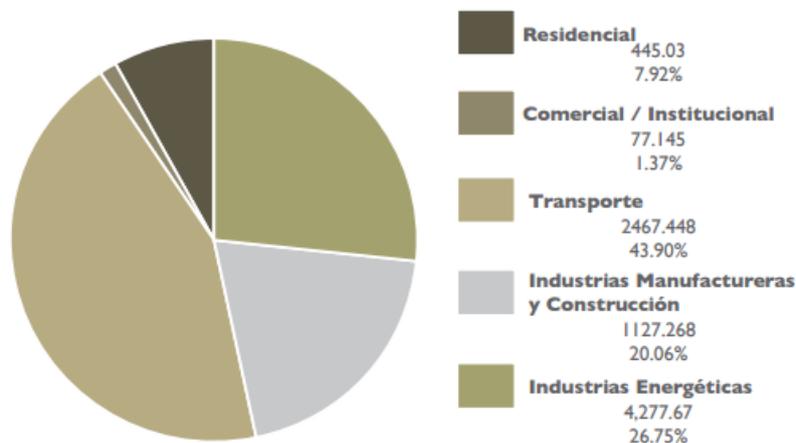


Figura 2.7 Contribución porcentual de emisiones de CO₂ por sector a partir de la quema de combustibles fósiles. Fuente: MARN-UCA 2010b.

Como una estrategia para frenar el aumento de las emisiones de CO₂ y otro tipo de gases con efecto invernadero de origen antropogénico se han celebrado una serie de convenios mundiales por parte de Naciones Unidas y otros organismos internacionales con el fin de crear alianzas con países del mundo para encontrar alternativas a la problemática de emisión de gases con efecto invernadero, y poder así lograr reducir la tasa promedio de emisiones a nivel mundial.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Composición de la atmosfera

Se denomina aire a la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad, siendo este esencial para la vida en el planeta. El aire atmosférico se compone de nitrógeno, oxígeno, que es la sustancia que permite la vida de animales y humanos, dióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de otros elementos (argón, neón, etc.), véase tabla 2.2.

Propiedades físicas del aire

- Es de menor densidad que el agua.
- Tiene Volumen indefinido.
- Es incoloro, inodoro e insípido

Propiedades químicas del aire

- ✓ Reacciona con la temperatura condensándose en hielo a bajas temperaturas y produce corrientes de aire. Está compuesto por varios elementos entre ellos el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2) elementos básicos para la vida.
- ✓ Importancia: El aire es indispensable para la vida de los seres vivos: plantas, animales y los seres humanos. Además permite que vuelen los aviones, ayuda a la navegación y puede producir energía (Energía Eólica).

Tabla 2.2. Composición del aire.

Gases Permanentes			Gases Variables			
Gas	Símbolo	Porcentaje (en volumen)	Gas y partículas	Símbolo	Porcentaje (en volumen)	Ppm
Nitrógeno	N ₂	78.08	Vapor de agua	H ₂ O	0 a 4	
Oxígeno	O ₂	20.95	Dióxido de carbono	CO ₂	0.037	368
Argón	Ar	0.93	Metano	CH ₄	0.00017	1.7
Neón	Ne	0.0018	Óxido de nitrógeno	N ₂ O	0.00003	0.3
Helio	He	0.0005	Ozono	O ₃	0.000004	0.04
Hidrogeno	H ₂	0.00006	Partículas		0.000001	0.01-0.15
xenón	Xe	0.000009	Cf C _s		0.00000002	0.0002

Fuente: tomado del sitio <http://ingenieroambiental.com/?pagina=695>

Según la altitud, la temperatura y la composición del aire, la atmósfera terrestre se divide en cinco capas:

- ✓ Troposfera
- ✓ Estratosfera
- ✓ Mesosfera
- ✓ Termosfera
- ✓ exosfera

A continuación se describe con más detalle la composición y la función de cada uno de estas capas en la atmósfera terrestre (véase figura 2.8).

- Troposfera

La troposfera es la capa inferior más próxima a la superficie terrestre de la atmósfera de la tierra. A medida que se sube, disminuye la temperatura en la troposfera. En la troposfera suceden los fenómenos que componen lo que se conoce como tiempo. Alcanza una altura media de 12 km, así como de 7 km en los polos, en la troposfera además se encuentra en el aire polvo, humo y vapores de agua.

- Estratosfera

La estratosfera es la segunda capa de la atmósfera de la Tierra, comprendida entre los 18 y 50 km de altura, en ella se encuentra la capa de ozono y se caracteriza por no tener ni nubes ni viento, además de ser la zona por la cual circulan los aviones. A medida que se sube, la temperatura en la estratosfera aumenta. El ozono provoca que la temperatura suba ya que absorbe la luz peligrosa del sol y la convierte en calor, por lo que el ozono es de enorme importancia para la vida en la tierra porque absorbe la mayor parte de rayos ultravioletas del Sol.

- Mesosfera

La mesosfera es la tercera capa de la atmósfera de la Tierra, La temperatura disminuye a medida que se sube, como sucede en la troposfera y puede llegar a ser hasta de -90° C. La mesosfera empieza después de la estratosfera. Se sitúa entre los 50 y los 100 km de altitud; su

temperatura media es de 10 °C; en ella los Meteoritos adquieren altas temperaturas y en su gran mayoría se volatilizan y consumen.

- Termosfera

La termosfera es la cuarta capa de la atmósfera de la Tierra y se encuentra arriba de la mesosfera; a esta altura, el aire es muy tenue y la temperatura cambia con la actividad solar, si el Sol está activo las temperaturas en la termosfera pueden llegar a 1,500° C y muchísimo más altas. La termosfera de la Tierra también incluye la región llamada *Ionosfera*⁸, esta capa empieza después de los 100 km y va desapareciendo gradualmente hasta los 500 km de altura. En esta región, constituida por oxígeno (O₂), la temperatura aumenta hasta los 1000°C; los rayos X y ultravioleta del Sol ionizan el aire enrarecido, produciendo átomos y moléculas cargados eléctricamente (que reciben el nombre de Iones) y electrones libres.

- Exosfera

La exosfera es la última capa de la atmósfera de la Tierra, esta es el área donde los átomos se escapan hacia el espacio. Esta capa comienza a 500km de altura y extiende más allá de los 1000km; está formada por una capa de helio y otra de hidrogeno. Después de esa capa se halla una enorme banda de radiaciones (conocida como Magnetosfera) que se extiende hasta unos 55,000km de altura, aunque no constituye propiamente un estrato atmosférico.

⁸ Ionosfera: está comprendida entre los 80 y 500 km de la superficie terrestre, es una zona cargada de partículas eléctricas, provenientes del sol, en ella se producen las auroras boreales.

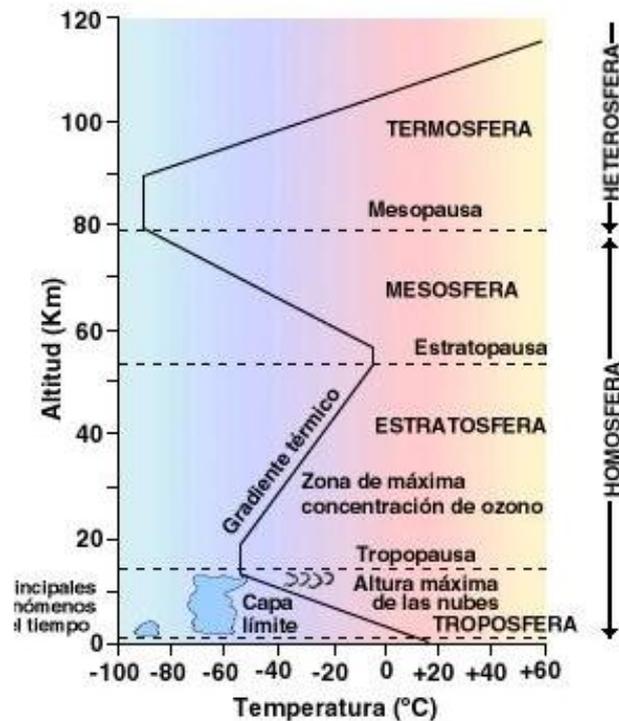


Figura 2.8. Composición de la atmósfera terrestre. La temperatura de la atmósfera terrestre varía con la altitud por lo tanto la relación entre la altitud y la temperatura es distinta dependiendo de la capa atmosférica considerada: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

Las porciones más importantes para análisis de la contaminación atmosférica son las dos capas cercanas a la Tierra: la troposfera y la estratosfera (figura 2.8), el aire de la troposfera interviene en la respiración. En esta capa de 7 km de altura en los polos y 16 km en los trópicos, se encuentran las nubes y casi toda el agua. En ella se generan todos los fenómenos atmosféricos que originan el clima. Más arriba, aproximadamente a 25 kilómetros de altura, en la estratosfera, se encuentra la capa de ozono, que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta (UV).

2.2.2 Contaminación de atmósferas urbanas

Antes de abordar la temática de contaminación atmosférica es necesario definir que es un contaminante, en otras palabras cuales son las condiciones que se necesitan para identificar a una sustancia como contaminante del aire. Una definición razonable de contaminante puede ser la siguiente: sustancia presente en mayor concentración a la natural como resultado de la actividad humana y que ejerce un efecto pernicioso sobre el ambiente o sobre algo valioso para el ambiente. También podría definirse como la presencia en el aire de materias o formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza, así como que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables.

Las unidades para indicar la concentración de las diferentes especies presentes en la atmósfera son las usuales en los sistemas de mezcla de gases, magnitudes relativas, como pueden ser las fracciones en volúmenes expresables en %, usualmente denominadas relaciones de mezcla.

No obstante, como las concentraciones de algunos contaminantes suelen ser muy pequeñas por lo que es más cómodo emplear en lugar de partes en 100, emplear partes por millón (ppm), o billón (ppb) o en trillón (ppt) se supone que se trata de partes por volumen (aunque a veces se indica explícitamente esto poniendo ppmv, ppbv, etc.). Naturalmente estas unidades solo tiene sentido para contaminantes gaseosos; en estos la fracción útil porque coincide con la fracción en moléculas.

Así por ejemplo cuando se dice que un contaminante se presenta en una concentración de 1ppm, se quiere decir que en la muestra gaseosa, una de cada 10^6 moléculas es del contaminante.

En la contaminación atmosférica intervienen una serie de Contaminantes que se pueden clasificar como primarios y secundarios:

- **Primarios:** Son los que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos por la fuente. Para fines de evaluación de la calidad del aire se consideran: óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.
- **Secundarios:** son aquellos que se forman mediante procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes en la atmósfera. Son importantes contaminantes secundarios el ácido sulfúrico (H_2SO_4) que se forma por la oxidación del (SO_2) el dióxido de nitrógeno (NO_2) que se forma al oxidarse el contaminante primario NO y el ozono (O_3) que se forma a partir del oxígeno (O_2). En los contaminantes secundarios se pone de manifiesto en que son asociados a la contaminación fotoquímica, a la lluvia acida y los agujeros de ozono.

2.2.3 Fuentes de contaminación atmosférica

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: las naturales y antropogénicas o artificiales. Esta última se refiere a las actividades humanas. Las emisiones naturales provienen principalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de materia orgánica en el suelo y en los océanos.

Fuentes naturales

Son factores que contaminan independientemente de las actividades humanas, como los vientos que producen polvaredas, erupciones volcánicas, la erosión de suelos e incendios forestales.

Fuentes artificiales

Son la que generan contaminación atmosférica a causa de las actividades humanas. Comprende las fuentes fijas y móviles.

- Fuentes fijas o estacionarias: es toda instalación establecida en un solo lugar y que tiene como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generan o pueden generar la emisión de sustancias contaminantes a la atmosfera. Incluyen a los sectores: químico, petróleo, pintura y tintas, de automóviles, de papel de acero, del vidrio, de la generación de electricidad, del cemento etc. Este tipo de actividades generan gases que son altamente contaminantes tales como: el óxido de azufre SO_2 , óxido nitroso NO_2 , dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono CO , hidrocarburos y partículas suspendidas.
- Fuentes móviles: es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, son fuentes móviles los vehículos automotores que circulan por carreteras tales como automóviles, camiones, autobuses, motocicletas, mototriciclos, motociclos etc.

En la mayor parte de las áreas urbanas los vehículos automotores contribuyen en gran medida a las emisiones de CO , NO_x , SO_x , partículas, compuestos tóxicos del aire y especies que reducen la visibilidad.

Las emisiones más comunes de los vehículos automotores son:

- ✓ las de tubo de escape
- ✓ las emisiones evaporativas: provenientes de fugas de combustión que ocurren cuando está operando el motor.
- ✓ las emisiones del tanque de combustible del vehículo por el aumento de la temperatura ambiente.
- ✓ las emisiones que se presentan cuando el motor no está operando y se deben a las fugas de combustible.
- ✓ las emisiones cuando el vehículo está en reposo en las gasolineras, durante la recarga de combustible.

Para entender mejor como es que se originan este tipo de sustancias contaminantes es necesario explicar los tipos de combustión que tiene lugar durante la quema de combustible.

2.2.4 Proceso de combustión

El proceso de combustión se caracteriza por una liberación de calor como resultado de la unión de Oxígeno con un elemento combustible. Este calor luego es transformado en trabajo, en el caso de los motores de combustión interna obtenemos la rotación de un eje. Las combustiones se realizan a veces lentamente, a veces muy rápidamente.

2.2.4.1 Tipos de Combustión

- Combustión completa:

Se le llama combustión completa a aquella que ocurre cuando el combustible es completamente oxidado, y toda la energía es liberada, lo que se muestra en la ecuación 2.1 y 2.2.



- Combustión incompleta

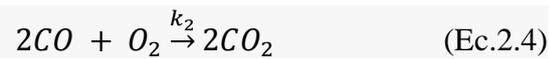
La combustión incompleta resulta cuando tenemos: 1) insuficiencia de Oxígeno, 2) Mezcla pobre el combustible con el Oxígeno; 3) una temperatura demasiado baja para sostener la combustión; 4) la cantidad de calor liberada disminuye grandemente. En este tipo de combustión se produce monóxido de carbono (CO), además de dióxido de carbono (CO₂).

Combustión incompleta de Carbón o de compuestos de Carbono

La formación de los óxidos de carbono es un proceso sencillo cuando los únicos reactivos son C y O₂. Cuando la combustión de materiales que contienen carbono transcurre en el aire, los procesos son más complejos, aunque se pueden extraer las siguientes conclusiones generales.

La combustión del carbón de los combustibles transcurre en dos etapas:





Con $k_1 = k_2$. El CO, que es producto intermedio, aparece cuando el oxígeno es insuficiente para completar el proceso (2), o incluso en presencia de bastante oxígeno, si la relación aire/combustible es inadecuada.

Este tipo de compuestos son los que aparecen en distinto porcentaje en los productos de la combustión, los cuales son expulsados al exterior en la forma de gases de escape. La composición de dichos gases depende de la clase de combustible utilizado, de la relación de aire y combustible, de las condiciones en que se realiza la combustión.

2.2.5 Como contamina un vehículo automotor

Los motores que impulsan a los automóviles, camiones, autobuses y motocicletas realizan una combustión incompleta del combustible, con que se alimentan y los residuos de esta combustión son lanzados al exterior a través del sistema de escape.

Aun en el caso de que todos los componentes del auto funcionen a la perfección este siempre va a generar elementos polucionantes. La situación empeora cuando además de los volúmenes contaminantes que corresponden a ese funcionamiento normal se le agregan desperfectos que incrementan la cantidad de gases y partículas sólidas que son arrojadas al exterior por los vehículos.

⁹ k significa el calor producido durante la combustión.

2.2.5.1 Contaminantes producidos por la gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos alifáticos obtenida del petróleo por destilación fraccionada, que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido por chispa convencional o por compresión (Otto), así como en estufas, lámparas, limpieza con solventes y otras aplicaciones. Tiene una densidad de 760 g/L^2 (un 20 % menos que el gasóleo (diésel), que tiene 850 g/L). Cuando se utiliza una maquina bien sincronizada y con suficiente aire produce dióxido de carbono CO_2 , Agua (H_2O) Óxidos de Nitroso (N_2O) y energía.

Algunos compuestos tóxicos se encuentran en la gasolina y se emiten al aire cuando esta se evapora o pasa a través del motor como combustible no quemado. El benceno por ejemplo, es un componente de la gasolina. Los vehículos emiten pequeñas cantidades de benceno en el combustible no quemado o cuando la gasolina se evapora.

Una cantidad significativa de benceno proviene de la combustión incompleta de compuestos de la gasolina, como el tolueno y el xileno, que son químicamente muy similares al benceno. Al igual que el benceno, estos compuestos se encuentran en forma natural en el petróleo y se concentran más cuando este se refina para producir gasolina de alto octanaje.

Descripción del funcionamiento de un motor de combustión interna (Motor Otto)

El motor de combustión interna, por su forma de funcionar, no es capaz de quemar de forma total el combustible en los cilindros. Pero si esta combustión incompleta no es regulada,

mayor será la cantidad de sustancias nocivas expulsadas en los gases de escape hacia la atmósfera.

La idea básica de los motores de explosión es aprovechar la energía generada por el combustible, al quemarse dentro de un cilindro. La energía que se libera de esta forma se transmite a un pistón móvil: así se produce trabajo mecánico que, por ejemplo, puede usarse para mover un vehículo. En los motores de ciclo Otto, la combustión se inicia mediante el salto de una chispa eléctrica proveniente de una bujía. Los combustibles de estos motores deben tener capacidad antidetonante, o sea, que no se enciendan antes de recibir la chispa fenómeno conocido como autoencendido. Los combustibles más usados son gasolina y gases (GNC).

El ciclo completo del motor consta de cuatro tiempos. El primer recorrido del pistón, desde la cámara de combustión hasta el final de la carrera, es la admisión, cuando entra al cilindro la mezcla integrada por combustible y aire. El segundo tiempo es la compresión : el pistón se mueve ahora en sentido contrario, comprimiendo la mezcla. El tercer tiempo es la expansión : se trata de la única carrera útil dentro del ciclo, al recibir la chispa, los gases se inflaman y ejercen una fuerte presión sobre el pistón, empujándolo hasta el extremo de carrera. El cuarto tiempo, por fin, es el del escape. Tiene un recorrido igual a la compresión pero, al estar la válvula de escape abierta, se produce la expulsión de los gases ya quemados¹⁰.

¹⁰ <http://www.iae.org.ar/archivos/educ1204.pdf>

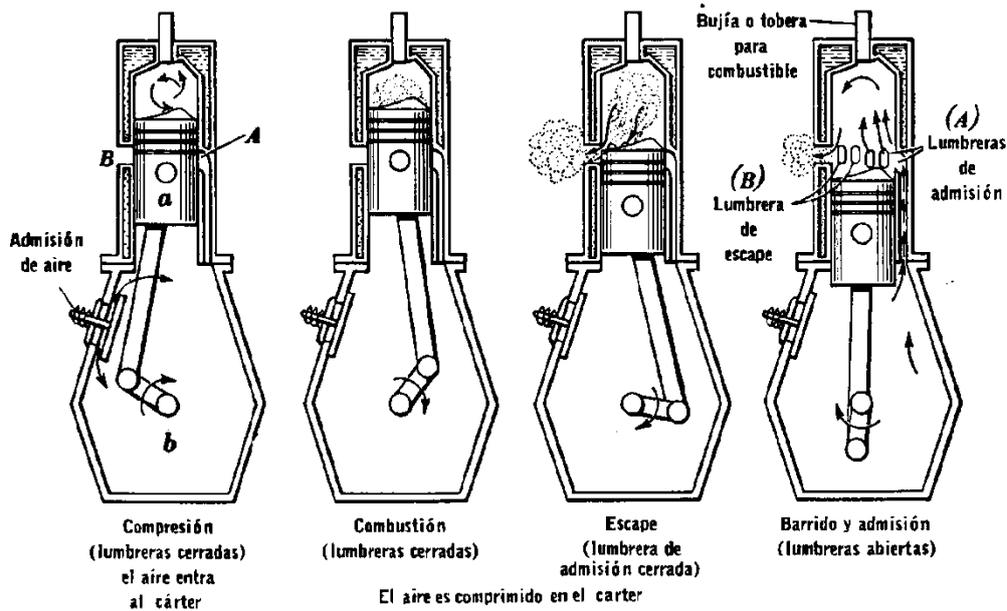


Figura 2.9. Descripción del funcionamiento del motor de combustión interna

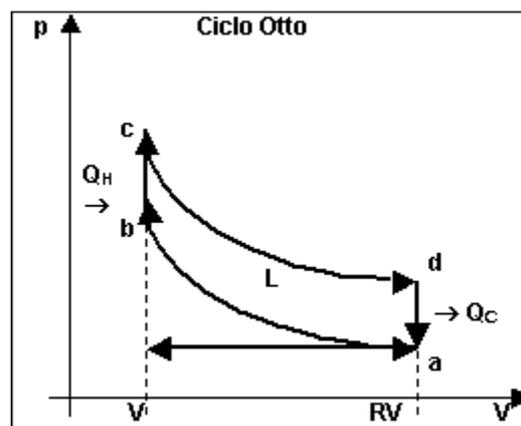


Figura 2.10. Ciclo de Otto: en el punto a la mezcla de gasolina y aire ya está en el cilindro, ab: contracción adiabática, cd: expansión adiabática, bc: calentamiento isocórico, ad: enfriamiento isocórico.

2.2.5.2 Contaminantes producidos por diésel

El diésel es también denominado gasoil, es un hidrocarburo líquido derivado del petróleo, producto de la destilación, tiene una densidad de 832 kg/m^3 ($0,832 \text{ g/cm}^3$), compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel.

El diésel produce dióxido de carbono CO_2 , agua (H_2O) óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_2), partículas (MP) y energía. Las emisiones de diésel son una mezcla de más de 400 partículas finas diferentes, vapores y materiales orgánicos tóxicos, que resultan cuando se quema el combustible diésel.

Más de 40 sustancias químicas de las emisiones de diésel han sido consideradas como contaminantes tóxicos (TAC) en el Estado de California (USA). Algunos de los contaminantes tóxicos del aire que se encuentran en las emisiones de diésel incluyen monóxido de carbono, dióxido de azufre, compuestos de cianuro, aldehídos, benceno, formaldehído, plomo inorgánico, compuestos de manganeso, compuestos de mercurio, metanol, fenol y arsénico.

Descripción del funcionamiento de un motor diésel

A diferencia de los motores de ciclo Otto, en los motores diésel el cilindro no aspira una mezcla de aire y combustible, sino sólo aire. El pistón comprime este aire a una presión alta, elevando mucho su temperatura. En ese instante se inyecta el combustible, que, al encontrarse con el aire caliente, se enciende y va quemándose a medida que entra en el cilindro. Los combustibles que se utilizan deben tener una velocidad de autoignición adecuada al régimen de operación de cada motor. De acuerdo a su tipo, se los clasifica en veloces, medios y lentos, que corresponden al gas oil, diésel oil, bunker y fuel oil, en ese orden.¹¹

¹¹ <http://www.iae.org.ar/archivos/educ1204.pdf>

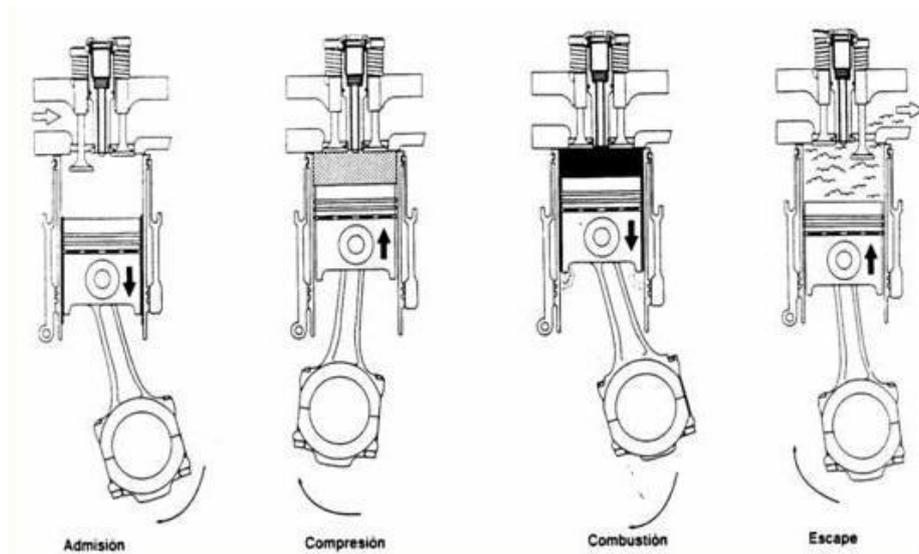


Figura 2.11. Motor diésel de cuatro tiempos, principios básicos de funcionamiento

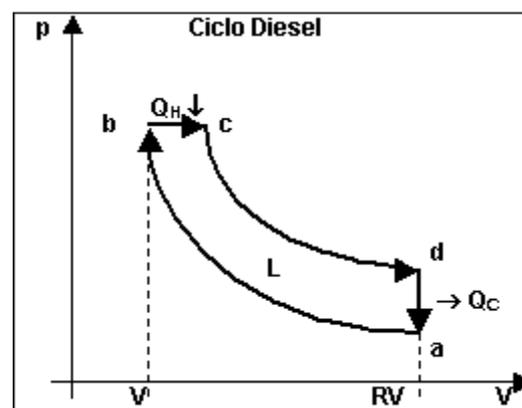


Figura 2.12. Ciclo termodinámico de un motor diésel. Un motor diésel puede modelarse con el ciclo ideal formado por seis pasos reversibles, según se indica en la figura. El gasoil se inyecta durante la carrera ab , ab : contracción adiabática, bc : expansión y calentamiento isobárica, cd : expansión adiabática, da : enfriamiento isocórico.

En la figura 2.13 se muestra un resumen de los diferentes tipos de gases que son generados por motor diésel y motor Otto.

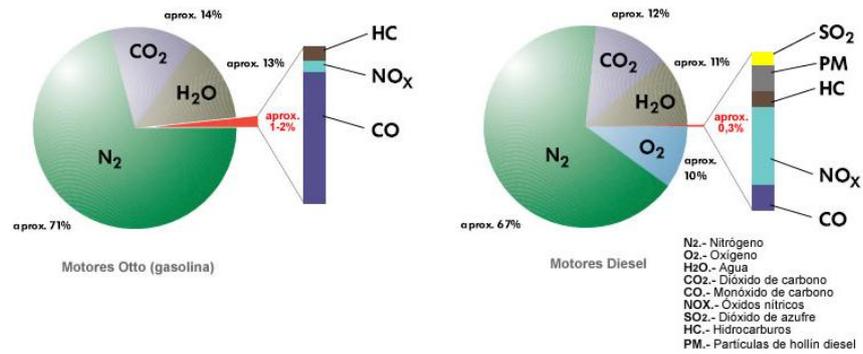


Figura 2.13. Composición de los Gases de escape generados el motor Otto y motor diésel. El motor diésel tiene una clara superioridad sobre el motor de gasolina en referencia al contenido del Monóxido de Carbono siendo el motor de gasolina el que provee de más Monóxido de Carbono a la atmósfera. Aunque el motor diésel pareciera ser menos contaminante que el de gasolina, no lo es en otros elementos como las partículas que despiden, por lo que se estaría frente a dos componentes proporcionalmente iguales en relación a la cantidad de contaminantes que expelen. FUENTE: página web; aficionados por la mecánica¹².

2.2.5.3 Gases contaminantes emitidos por vehículos automotores

Los gases emitidos por un motor de combustión son principalmente de dos tipos: contaminantes y no contaminantes. Los primeros están formados fundamentalmente por el Monóxido de Carbono, Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno y Plomo. Los segundos o no contaminantes están formados por Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de Carbono, vapor de agua e Hidrógeno. A continuación se explica con detalle cada uno de ellos.

- Nitrógeno (N₂):** el nitrógeno es un gas no combustible, incoloro e inodoro, se trata de un componente esencial del aire que respiramos (78 % nitrógeno, 21 % oxígeno, 1 % otros gases) y alimenta el proceso de la combustión conjuntamente con el aire de admisión. La mayor parte del nitrógeno aspirado vuelve a salir puro en los gases de escape; sólo una pequeña parte se combina con el oxígeno O₂ (óxidos nítricos NO_x).

¹² <http://www.aficionadosalamecnica.net/emision-gases-escape.htm>

- **Oxígeno (O₂):** es un gas incoloro, inodoro e insípido. Es el componente más importante del aire que respiramos (21 %). Es imprescindible para el proceso de combustión, con una mezcla ideal el consumo de combustible debería ser total, pero en el caso de la combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.
- **Agua (H₂O):** es aspirada en parte por el motor (humedad del aire) o se produce con motivo de la combustión “fría“(fase de calentamiento del motor). Es un subproducto de la combustión y es expulsado por el sistema de escape del vehículo, se lo puede visualizar sobre todo en los días más fríos, como un humo blanco que sale por el escape, o en el caso de condensarse a lo largo del tubo, se produce un goteo. Es un componente inofensivo de los gases de escape.
- **Dióxido de carbono (CO₂):** se produce al ser quemados los combustibles que contienen carbono (p. ej. gasolina, diésel). El carbono se combina durante esa operación con el oxígeno aspirado. Es un gas incoloro, no combustible.

El dióxido de carbono CO₂ a pesar de ser un gas no tóxico, reduce el estrato de la atmósfera terrestre que suele servir de protección contra la penetración de los rayos UV, convirtiéndolo en el principal potenciador del efecto invernadero intensificado.

El dióxido de carbono es el vasodilatador cerebral más poderoso conocido. La inhalación de grandes concentraciones causa insuficiencia circulatoria rápida que conduce a coma y muerte. Es probable que ocurra asfixia antes de los efectos de sobreexposición al dióxido de carbono. No se conocen efectos crónicos, dañinos de inhalación repetida a bajas concentraciones. Bajas concentraciones de dióxido de carbono causan respiración en aumento y jaquecas.

- **Monóxido de Carbono (CO):** se produce con motivo de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. Es un gas incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico, es más pesado que el oxígeno o el aire y desplaza al oxígeno de la atmósfera. En una concentración normal en el aire ambiental se oxida al corto tiempo, formando dióxido de carbono CO₂.

Si se respira, aunque sea en moderadas cantidades, el monóxido de carbono puede causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos porque sustituye al oxígeno en la hemoglobina de la sangre. Tiene una afinidad por el grupo hemo 220 veces mayor que el oxígeno.

Una vez respirada una cantidad bastante grande de monóxido de carbono (teniendo un 75% de la hemoglobina con monóxido de carbono) la única forma de sobrevivir es respirando oxígeno puro. Cada año un gran número de personas pierde la vida accidentalmente debido al envenenamiento con este gas. Las mujeres embarazadas y sus bebés, los niños pequeños, las personas mayores y las que sufren de anemia, problemas del corazón o respiratorios pueden ser mucho más sensibles al monóxido de carbono.

- **Nítricos (NO_x) :** son combinaciones de nitrógeno N₂ y oxígeno O₂ (p. ej. NO, NO₂, N₂O,...). Los óxidos de nitrógeno se producen al existir una alta presión, alta temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. En la cámara de combustión se forma el NO, al abrirse la válvula de escape los gases pasan al conducto de escape donde se combinan para formar NO₂, por lo tanto en el escape se encuentra NO y NO₂ de ahí que para aglutinarlos se dice que hay restos de NO_x.

El monóxido de nitrógeno (NO), es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al combinarse con el oxígeno del aire, es transformado en dióxido de nitrógeno (NO₂), de color pardo rojizo y de olor muy penetrante, provoca una fuerte irritación de los órganos respiratorios.

Las medidas destinadas a reducir el consumo de combustible suelen conducir lamentablemente a un ascenso de las concentraciones de óxidos nítricos en los gases de escape, porque una combustión más eficaz produce temperaturas más altas. Estas altas temperaturas generan a su vez una mayor emisión de óxidos nítricos.

- **Dióxido de azufre (SO₂)** : el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso propicia las enfermedades de las vías respiratorias además puede causar trastornos pulmonares permanentes, pero interviene sólo en una medida muy reducida en los gases de escape. Es un gas incoloro, de olor penetrante, no combustible. La emisión de SO₂ es pequeña en los motores de gasolina, en los de diésel es superior por el tipo de combustible utilizado.

Si se reduce el contenido de azufre en el combustible es posible disminuir las emisiones de dióxido de azufre. Al igual que los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre es uno de los principales causantes del smog y la lluvia ácida.

- **Plomo (Pb)**: el plomo ha desaparecido por completo en los gases de escape de los vehículos. En 1985 se emitían todavía a la atmósfera 3.000 toneladas, debidas a la combustión de combustibles con plomo. El plomo en el combustible impedía la combustión detonante debida a la autoignición y actuaba como una sustancia amortiguadora en los asientos de las válvulas. Es venenoso, inhalado puede provocar la formación de coágulos o trombos en la sangre, de gravísimas consecuencias patológicas. Con el empleo de aditivos ecológicos en el combustible sin plomo se han podido mantener casi idénticas las características antidetonantes.
- **HC – Hidrocarburos**: son restos no quemados del combustible, que surgen en los gases de escape después de una combustión incompleta. La mala combustión puede ser debido a la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica) o también por una baja

velocidad de inflamación (mezcla pobre), por lo que es conveniente ajustar la riqueza de la mezcla.

Los hidrocarburos HC se manifiestan en diferentes combinaciones (p. ej. $C_6 H_6$, $C_8 H_{18}$) y actúan de diverso modo en el organismo. Algunos de ellos irritan los órganos sensoriales, mientras que otros son cancerígenos (p. ej. el benceno; es venenoso por sí mismo y la exposición a este gas provoca irritación de piel, ojos y conductos respiratorios, si el nivel es muy alto, provocara depresiones, mareos, dolores de cabeza y nauseas).

- **Las partículas de hollín MP** (masa de partículas; inglés: particulate matter)

Son generadas en su mayor parte por los motores diésel, se presentan en forma de hollín o cenizas. Los efectos que ejercen sobre el organismo humano todavía no están aclarados por completo.

2.2.6 Marco legal

Dentro de la legislación nacional vigente, se encuentran una diversidad de leyes, reglamentos y normas de calidad ambiental que buscan la protección de la atmosfera, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Ley del medio ambiente

La ley del medio ambiente desarrolla el tema de la protección de la atmosfera, en el capítulo III, prevención y control de contaminación. Dentro de este capítulo, se encuentra el artículo 47 que establece tres criterios elementales que se consideran:

- a) Asegurar que la atmosfera no sobrepase los niveles de concentración permisibles de contaminantes establecidos en las normas técnicas de calidad de aire relacionado con

estas sustancias o combinaciones de estas partículas, ruidos, olores, vibraciones, radiaciones y alteraciones lumínicas y provenientes de fuentes artificiales, fijas o móviles.

- b) Prevenir, disminuir o eliminar gradualmente las emisiones contaminantes en la atmosfera en beneficio de la salud y el bienestar humano y del ambiente; y
- c) El ministerio con el apoyo del sistema nacional de gestión del medio ambiente elaborara y coordinara la ejecución, de planes nacionales para el cambio climático y la protección de la capa de ozono, que faciliten el cumplimiento de los compromisos internacionales ratificados por El Salvador.

- Reglamento de la ley del medio ambiente

El reglamento general de la ley del medio ambiente, desarrolla la protección a la atmosfera en el título IV. De la protección ambiental, capítulo único de la prevención y el control de la contaminación. Dentro de este artículo el artículo 65 desarrolla la contaminación atmosférica producida por fuentes fijas o estacionarias.

En el caso que las fuentes contaminantes sean móviles, el reglamento desarrolla en su artículo 66 que los concesionarios de líneas de transporte (aéreo, terrestre, marítimo, público) deben de respetar todos los niveles máximos permitidos para evitar la contaminación de la atmosfera. Esto se concretiza mediante la revisión y mantenimiento adecuado de todas las unidades de transporte.

- Ley de transporte tránsito y seguridad vial:

La ley de transporte terrestre tránsito y seguridad vial, desarrolla en su título V. capítulo único, la contaminación ambiental. El artículo 100, establece con el objetivo de minimizar la contaminación atmosférica, la prohibición de circulación de los siguientes vehículos: los que desde el 1 de julio de 1996 los vehículos que consumieran más de trece milésimas de gramo de plomo por litro de combustible como aditivo y los que utilicen diésel con alto contenido de azufre que sea superior al límite establecido por las normas internacionales de protección ambiental.

El viceministerio de transporte estableció como plazo el 31 de diciembre de 1997, para que todos los vehículos tengan un sistema de control de emisiones; para evitar la contaminación atmosférica con ruido, gases y humo.

- Reglamento general de tránsito y seguridad vial

El reglamento desarrollo en su título VII, el tema de la contaminación ambiental. El artículo 217 establece que para que puedan circular los vehículos, estos deben de contar con su certificado de control de emisiones de partículas, humos y gases, y estar dentro de los límites permitidos de emisiones. En los casos de los vehículos importados, el reglamento estableció que desde el 1° de enero de 1999 para permitir su ingreso al país deben de contar con un sistema de control de emisiones.

- Reglamento de normas técnicas de calidad ambiental:

El reglamento de las normas técnicas de calidad ambiental desarrolla en su capítulo III, la calidad de aire. El artículo 9 plasma los límites máximos permitidos, con el objetivo de preservar el medio ambiente y la salud humana. Establece los parámetros permitidos de los contaminantes del aire, así como los valores máximos permitidos y los periodos permitidos, los cuales se muestran con más detalle en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros permitidos de los contaminantes del aire y valores máximos permisibles

Parámetros	Unidades	Valores Máximos Permisibles	Periodo
Dióxido de azufre	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	80	anual
Dióxido de azufre	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	365	24 horas
Monóxido de carbono	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10,000	8 horas
Monóxido de carbono	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	40,000	1 hora
Óxido de nitrógeno	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
Óxido de nitrógeno	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	150	24 horas
Ozono	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	120	8 horas
Ozono	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	60	Anual
Partículas inhalables (PM_{10})	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50	Anual
Partículas inhalables (PM_{10})	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	150	24 horas
Partículas inhalables ($\text{PM}_{2.5}$)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	15	Anual
Partículas inhalables ($\text{PM}_{2.5}$)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	65	24 horas
Partículas totales suspendidas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	75	Anual
Partículas totales suspendidas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	260	24 horas
Plomo (pb)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.5	anual

- NSO 13.11.03.01 Emisiones Fuentes Móviles

Esta norma se creó con el objetivo de instaurar las demarcaciones permitidas para las emisiones producidas por las fuentes móviles que contaminan la atmosfera. Se excluye de estas normas los utilizados en competencias de velocidad.

Se establece para los vehículos con motor que encienden por chispa que utilicen gasolina, gasohol, alcohol u otras sustancias para su funcionamiento, cualquiera que sea su tipo y peso los siguientes límites máximos permitidos los cuales se especifican en la tabla 2.4 que se muestra a continuación.

Tabla 2.4. Límites máximos para vehículo con motor de encendido por chispa

CONTAMINANTE	SIMB	UNIDAD	LIMITE	
			Antes 01/ene98	Después 01/ene98
Hidrocarburos	HC	Ppm	≤ 600	≤ 125
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	≥ 10.5	≥ 12.0
Monóxido de Carbono	CO	%	≤ 4.5	≤ 0.5

Fuente: diario oficial, tomo 360, san salvador 26 de agosto de 2003

Observación del autor de este trabajo de investigación: los límites atribuidos al dióxido de carbonos expresados en porcentaje no deberían ser \geq sino \leq

En la tabla 2.5 se muestran los límites permisibles que han sido establecidos para vehículos que utilicen combustible diésel.

Tabla 2.5. Límites máximos permisibles para vehículos con motor diésel

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE	
		Antes01/ene98	Después01/ene99
Microbuses y vehículos <3.0 tm			
Opacidad	%	70	60
Opacidad	K	2,8	-
Vehículos diésel turboalimentado <3.0 tm			
Opacidad	%	80	70
Opacidad	K	3,5	2,8
Autobuses o vehículos ≥ 3.0 tm			
Opacidad	%	80	70
Opacidad	K	3,5	2,8

Fuente: diario oficial, tomo 360, San Salvador 26 de agosto de 2003

2.2.7 Efecto invernadero

Todos absolutamente todos los cuerpos emiten radiación; estos rayos o fotones son ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance. Como cualquier onda, las electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda o alternativamente por su frecuencia, siendo ambas cantidades inversamente proporcionales; una onda larga es de baja frecuencia y una corta es de alta frecuencia. Se llama espectro electromagnético el o un conjunto total o parcial de onda de diversas frecuencias (Garduño 1998).

La luz visible es la radiación electromagnética más conocida; abarca cierto intervalo del espectro y tiene colores diversos que van desde al violeta conforme su frecuencia va

aumentando. Más allá del violeta siguen sucesivamente, según crece su frecuencia, la radiación (o luz) ultravioleta de los rayos X y los gama (γ). Más cerca al rojo están formadas, conforme disminuye su frecuencia, la radiación, la radiación (o luz) infrarroja, las microondas y las de TV y el radio (garduño 1998).

La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos; por un lado, la cantidad de radiación aumenta tremendamente conforme lo hace la temperatura, y, por otro, su longitud de onda disminuye cuando la temperatura sube.

En la atmosfera y el clima actúan dos tipos de radiación claramente distintos; la luz visible originada en Sol y la radiación infrarroja (invisible) emitida por la Tierra. La enorme diferencia entre ellas se debe a la gran disparidad de temperatura; el sol emite su radiación como a 6 mil grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$); en cambio, los elementos de la tierra (el suelo, el mar, los casquetes polares, las capas atmosféricas, las nubes, etc.), lo hacen a temperaturas que andan alrededor de 0°C . Por esta gran diferencia en su longitud de onda a la radiación solar se le llama de onda corta, y a la terrestre, de onda larga, constituyendo espectros francamente ajenos.

Por estar a una corta distancia del Sol y tener un determinado albedo (blancura, capacidad de reflejar la radiación que le llega), la tierra debería tener una temperatura característica de equilibrio llamada efectiva. Si el planeta estuviera más lejos del sol, sería más frío, y fuera más negro (o mate) sería más caliente. Naturalmente, a mayor distancia de la fuente se recibe menos radiación, y un cuerpo más oscuro (o con menos brillo) absorbe más radiación. La temperatura efectiva es el resultado neto del balance entre la radiación solar (de onda corta) absorbida por la tierra y la emitida (en onda larga) por ella misma (toharía 1984).

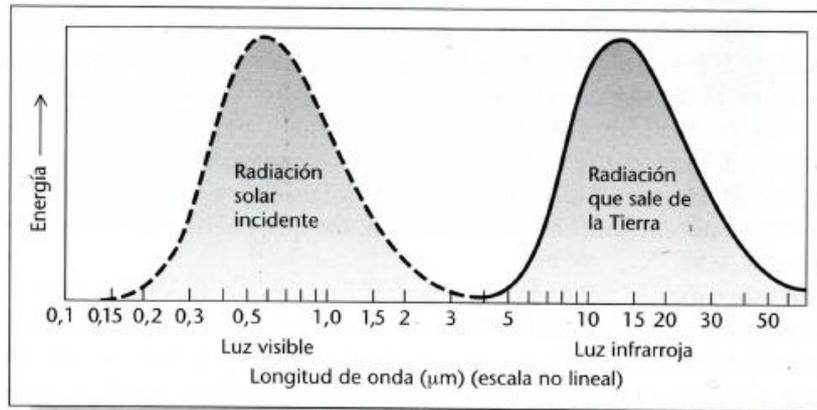


Figura 2.14. Esquema radiativo tierra/sol. Adicionalmente, la Tierra también emite energía, como cualquier otro cuerpo caliente, en forma de radiación IR y además mucha energía porque si no hubiera un equilibrio entre la energía recibida por el Sol y la emitida por la Tierra, la Tierra estaría permanentemente calentándose y eso no sucede.

Los valores concretos del albedo planetario y de la distancia del planeta a la estrella determina para la Tierra una temperatura efectiva de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, un valor típico promedio anual global es de $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. esta gran diferencia entre la temperatura efectiva y la real se debe al efecto invernadero, que se da en cualquier planeta o satélite natural que tenga atmósfera. Es decir, si la tierra no tuviera atmosfera seria 33°C mas fria, un planeta helado.

El efecto invernadero resulta de que el aire es muy transparente para la radiación de onda corta y muy opaco a la de onda larga (radiación infrarroja): o sea que la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares unos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre (y por los demás componentes de la Tierra), que se calientan en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre que es detenida (absorbida) por la atmósfera y las nubes. las capas atmosféricas (y las nubes) van sucesivamente absorbiendo, calentándose y reemitiendo (hacia arriba y hacia abajo) radiación térmica procedente de abajo. El resultado

de este complejo mecanico es sencillo: la atmósfera superficial es calida y se va enfriando conforme uno asciende a travez de ella. En realidad, el complejo dispositivo esbozado se complica mas por mecanismos termodinamicos no radiacionales. En primer lugar la conveccion atmosferica, consiste en que el aire inferior, al calentarse por el contacto directo con la superficie y por la radiacion procedente de ella, se dilata, aligera y sube, al tiempo que las porciones frias superiores descienden, en un proceso continuo de mezcla vertical. En segundo esta el mecanismo de cambio de fase del agua, consiste en que el aire ascendente se enfria principalmente porque la densidad y la presion de la atmósfera disminuyen con la altura y entonces el vapor de agua contenido en el se condensa, pasando de la fase gaseosa a la liquida, este proceso libera calor.

De cualquier modo, el resultado neto es el ya mencionado: la temperatura disminuye con la altura. Es decir, aunque en última instancia el Sol es la fuente original de la anergia térmica (o calor) contenida en la atmósfera, esta no se calienta por arriba sino por abajo. Por supuesto, y debido al albedo planetario, no toda la radiación es absorbida por la Tierra; una porción considerable es reflejada y devuelta hacia el espacio exterior. Tampoco toda la radiación terrestre es atrapada por la atmósfera (y las nubes); una parte se fuga también hacia el espacio. El efecto invernadero es producido por la fracción absorbida de ambas radiaciones (Garduño 1998, Hardy et al. 1986 y Voituriez 1994). En la figura 2.15 se ilustra este tipo de proceso.

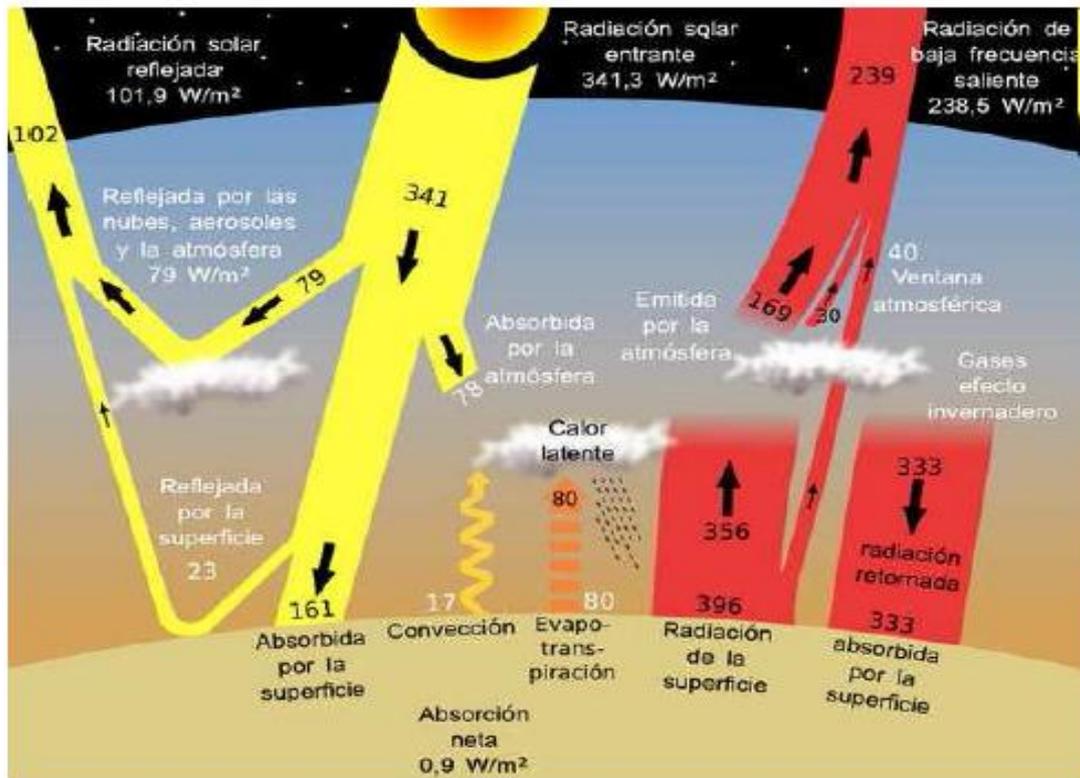


Figura 2.15. Balance energético de la Tierra; usualmente, el balance energético se presenta en W/m^2 , observándose que existe un balance positivo que corresponde a una absorción neta de $0,9 W/m^2$ por parte de la Tierra.

2.2.7.1 Gases con efecto invernadero

Como anteriormente se mencionaba que el efecto invernadero es un proceso que se da de forma natural en la tierra debido a la presencia de la atmósfera, y que es vital para procurar la vida en la Tierra, proporcionando mediante este mecanismo una temperatura global de $15^{\circ}C$, comparado con los $-18^{\circ}C$ que se tendrían sino existiese tal efecto. El efecto invernadero no sería posible sin la presencia de ciertos gases en la atmósfera llamados gases de efecto invernadero que a pesar que solo constituyen el 1% de la atmósfera juegan un papel de suma importancia para emantener el balance energético de la Tierra.

Se denominan gases de efecto invernadero a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la Tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera. Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Por ejemplo el metano es oxidado a dióxido de carbono, y este es absorbido por los océanos o las plantas. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera mayor es su potencial de calentamiento global (PCG).

Los gases con efecto invernaderos son:

- Dioxido de Carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Oxido nitroso (NO_2)
- Ozono (O_3)
- Hidrofluorocarbonos (HFCs)
- Perfluorocarbonos (PFCs)
- Hexafluoruro de azufre (SF_6)

Cada uno de estos gases tiene un potencial de radiación característico, también conocido como potencial de calentamiento global (PCG); el cual es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia por lo general dióxido de carbono. Por ejemplo, el PCG del metano, a 20 años, es de 62 (véase figura 2.16), que significa que si la misma masa de metano y de dióxido de carbono se introduce en la atmósfera, el metano atrapa 62 veces más de calor, que el dióxido de carbono durante los próximos 20 años.

GAS	VIDA MEDIA (AÑOS)	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL HORIZONTE TEMPORAL			
		20 AÑOS	100 AÑOS	500 AÑOS	
Bióxido de carbono	CO ₂		1	1	1
Metano	CH ₄	12	62	23	7
Óxido nitroso	N ₂ O	114	275	296	156
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	10,200	10,600	5,200
HCFC-21	CHCl ₂ F	2	700	210	65

Fuente: IPCC 2001

Figura 2.16. Potenciales de calentamiento global (en una base masica) en relacion con el dióxido de carbono para algunos gases cuyas vidas medias han sido bien caracterizadas. Fuente: IPCC 2001

El potencial de calentamiento atmosférico depende de los siguientes factores:

- La absorción de la radiación infrarroja por una determinada especie
- La ubicación del espectro de absorción de las longitudes de onda
- La vida en la atmósfera, de las especies

2.2.7.2 Absorción de radiación infrarroja de los gases con efecto invernadero

- Espectro de absorción infrarroja

Un espectro de infrarrojo consiste en un espectro de absorción que implica transiciones entre niveles vibracionales. Dado que una molécula poliatómica tiene $3N-6$ ($3N-5$ si es lineal) grados de libertad vibracionales, su espectro de infrarrojo puede presentar dicho número de bandas de absorción, cuyas energías corresponderán a la frecuencia de cada modo

vibracional. Para que una vibración dé lugar a una absorción de infrarrojo, debe causar un cambio en el momento dipolar de la molécula. Así, la intensidad de una banda de infrarrojo será mayor cuanto mayor sea el cambio en el momento dipolar con la vibración.

La principal utilidad de la espectroscopia de infrarrojo deriva del hecho de que los grupos funcionales mantienen cierta individualidad dentro de las moléculas, afectando sus vibraciones fundamentalmente al enlace considerado. Según el modelo clásico del oscilador armónico. La frecuencia de las fuerza de las vibraciones se obtiene mediante la ley de Hooke (Ec.2.5):

$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

ν : frecuencia de vibración (cm⁻¹)

μ : masa reducida de los átomos (g): $\mu = m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$

k : constante de fuerza relacionada con la fuerza de disociación del enlace, o fuerza de enlace.

Donde k es la constante de fuerza del enlace y μ la masa reducida del sistema. Como resultado, se encuentra que los diferentes grupos funcionales se caracterizan por diferentes frecuencias vibracionales, que naturalmente van asociadas a bandas distintas en el espectro de infrarrojo.

- Interpretación del espectro de infrarrojo del aire.

Las moléculas monoatómicas de un solo átomo, como las del argón (Ar) y otros gases nobles y las moléculas diatómicas homonucleares tales los gases N₂ y O₂ que son los componentes mayoritarios de la atmosfera apenas absorben radiación infrarroja, de manera que contribuyen poco al efecto invernadero, la razón es porque son moléculas apolares, esto quiere decir que

cuando los átomos de estas moléculas vibran, no cambia el momento dipolar eléctrico de la molécula, dicho de otra manera lo que sucede es que si los átomos de la molécula cambian levemente la distancia entre ellos o sus posiciones relativas, “la simetría eléctrica” de la molécula no cambia. Las principales responsables de la absorción IR son las moléculas más complejas, con átomos de varios elementos, que constituyen únicamente alrededor del 1% de la masa atmosférica y que sí modifican su momento dipolar cuando sus átomos vibran.

Por ejemplo, el hexafluoruro de azufre (SF_6) es capaz de absorber y emitir radiación infrarroja de una forma extraordinariamente eficaz, de modo que, a igualdad de moléculas, contribuiría más que cualquier otra sustancia de la atmósfera al efecto invernadero. Afortunadamente, este gas sólo existe en cantidades minúsculas en la atmósfera o las cosas serían bien distintas a cómo son.

Para que una molécula adquiera energía de rotación infrarroja debe tener un dipolo permanente, es decir, debe tener una separación de cargas permanente. La adquisición por parte de una molécula de energía de vibración de la radiación infrarroja está asociada con un cambio del momento del dipolo. Para que un gas pueda absorber o emitir radiación hace falta que la frecuencia de la radiación sea bastante cercana a la frecuencia de la vibración de la molécula del gas.

El momento de los dipolos se mide en unidades Debyes (D): $1\text{D} = 3.33564 \times 10^{-30} \text{ Cm}$ (coulombio metro), véase figura 2.17 a continuación.

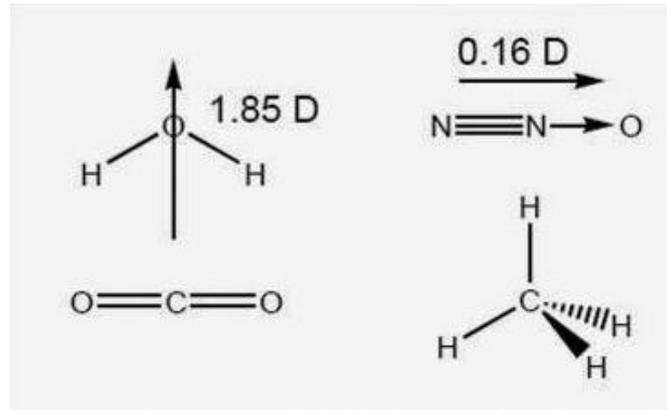


Figura 2.17. Moléculas de H_2O , N_2O , CO_2 y CH_4 en reposo. H_2O y N_2O son dipolos en reposo; las flechas indican la dirección del polo más negativo. CO_2 y CH_4 no son dipolos en reposo.

Las moléculas de O_2 y N_2 , los dos principales componentes de la atmósfera son totalmente simétricas, y al vibrar no adquieren cargas positivas en un lado y negativas en el otro, es decir, no forman dipolos, y es por eso que no son gases de efecto invernadero.

Las moléculas de más de dos átomos pueden vibrar de manera que, en ciertos casos, se producen dipolos, razón por la cual interactúan con la radiación infrarroja procedente de la superficie terrestre.

Las moléculas tienen diversos tipos de vibración (véase figura 2.18):

- **Vibración de tensión:** los átomos que están unidos por enlaces simples, dobles o triples se acercan y alejan siguiendo la dirección del enlace, igual que oscilan dos masas unidas por un muelle. Este movimiento oscilatorio ocurre en todos los enlaces de las moléculas en todas las condiciones de temperatura, incluso en el cero absoluto donde las oscilaciones pueden ser simétricas o antisimétricas.

La frecuencia exacta del movimiento oscilatorio depende sobre todo del tipo de enlace, esto es, si es sencillo, doble o triple, y de la identidad de los átomos implicados. Para muchos tipos de enlace, por ejemplo, para el enlace C – H en el agua, la frecuencia de tensión no se encuentra en la región del infrarrojo térmico. La frecuencia de tensión de los enlaces carbono-flúor, sin embargo, corresponde a la longitud de onda en el rango del infrarrojo térmico de 4 a 50 μ m y por lo tanto, cualquier molécula en la atmósfera que posea enlaces CF absorberá la luz térmica IR que escapa intensificando el efecto invernadero.

- Vibración de deformación: varían los ángulos de enlace, si varían en el plano pueden ser de tijereteo o de balanceo y si varían fuera del plano pueden ser de torsión de aleteo.

La absorción de luz por una molécula ocurre eficientemente cuando las frecuencias de la luz y de una de sus vibraciones coinciden. Sin embargo, la luz de una frecuencia algo mayor o algo menor que la de vibración, puede ser absorbida en cierta extensión por un buen grupo de moléculas.

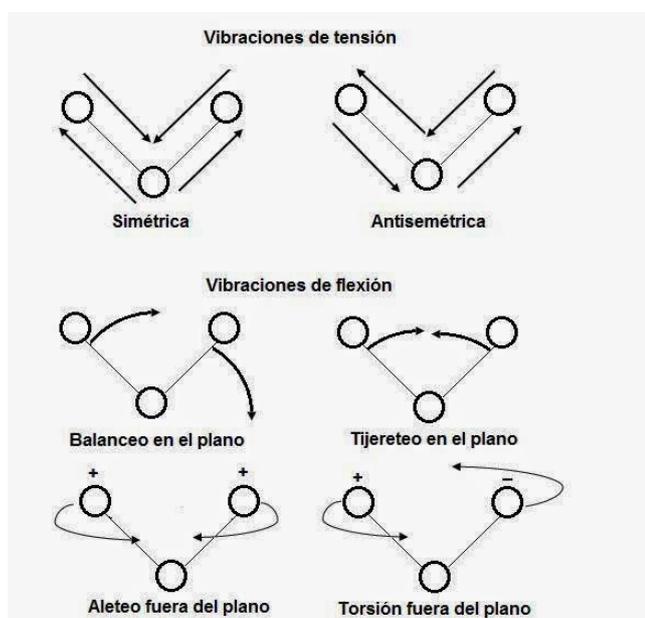


Figura 2.18. Tipos de modos vibracionales de una molécula poliatómica. NOTA: (+) indica un movimiento del plano de la página hacia el observador; (-) indica un movimiento del plano de la página alejándose del observador.

La capacidad de las moléculas de absorber luz infrarroja en un rango corto de frecuencias en lugar de absorber justamente una única frecuencia, ocurre debido a que esta no es la única energía asociada con la vibración que cambia cuando se absorbe un fotón infrarrojo, hay también, un cambio en la energía asociada con la rotación de las moléculas alrededor de su eje interno.

A continuación se detalla de forma más específica los grados de libertad vibracional de cada uno de los gases con efecto invernadero.

Dióxido de Carbono (CO₂)

La molécula de CO₂ presenta una estructura lineal y por tanto sus grados de libertad vibracionales son cuatro. Dado que el momento dipolar permanente de la molécula es nulo, la vibración de tensión simétrica no será activa en el espectro de infrarrojo. En cambio la vibración de tensión asimétrica (vibración paralela) producirá una banda de absorción, con una frecuencia correspondiente a un número de onda de 2.349 cm^{-1} ($\lambda = 4,2 \text{ }\mu\text{m}$), que está en la zona donde la radiación infrarroja es muy poco importante. Así como las dos vibraciones de flexión (vibraciones perpendiculares), las cuales tiene una misma frecuencia y cuyo número de onda es $\nu = 667 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 15 \text{ }\mu\text{m}$) que son degeneradas en energía y por tanto aparecen como una sola señal en el espectro.

Las vibraciones por flexión son las más importantes para el efecto invernadero, ya que su número de onda se sitúa en la frecuencia de máxima radiación de la superficie terrestre,

mientras que la de estiramiento tiene una frecuencia en la que la radiación infrarroja de la superficie terrestre es muy débil. En La figura 2.19 se muestra con más detalle los modos de vibración fundamentales de una molécula de CO₂.

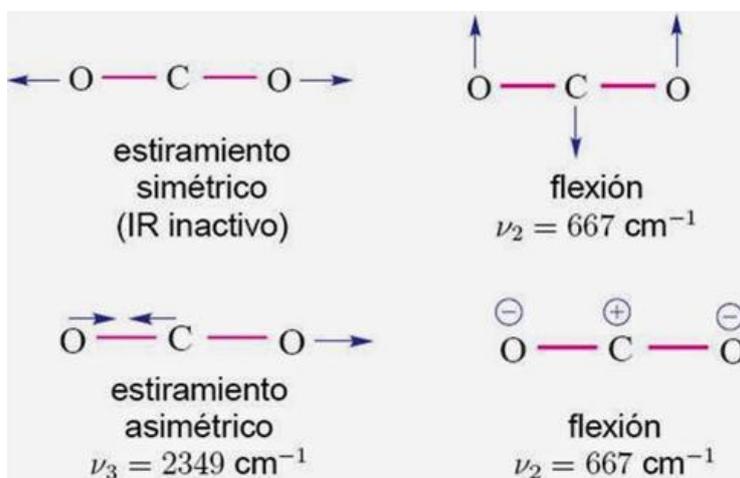


Figura 2.19. Modos de vibración de los átomos de una molécula de CO₂

Molécula de agua (H₂O)

La molécula de agua tiene un dipolo permanente, todas las vibraciones debidas a rotaciones también lo tienen, y estas rotaciones se encuentran en prácticamente todo el espectro de infrarrojos. Además, tiene tres vibraciones fundamentales: flexión, estiramiento simétrico y estiramiento asimétrico, con unos números de onda de 3.650, 1.600 y 3.760 cm⁻¹ ($\lambda = 2,7, 6,2$ y 2,7 μm , respectivamente). Únicamente la vibración cuyo número de onda es 1.600 cm⁻¹ es relevante para la absorción de infrarrojos, ya que las otras dos están en una zona donde la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra es prácticamente nula.

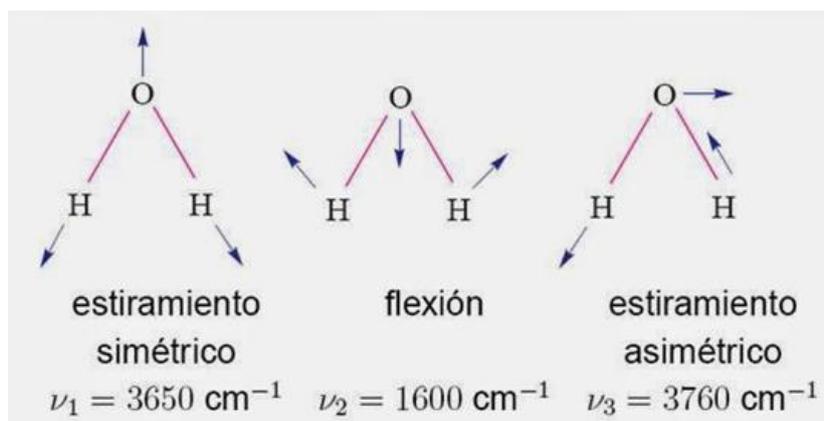


Figura 2.20. Modos de vibración de los átomos de una molécula de agua H_2O

Molécula de metano (CH_4)

La molécula de metano tiene nueve modos de vibración posibles, pero la mayoría no forman dipolos porque conservan la simetría. La única frecuencia de vibración en el rango de 130 a 2.500 cm^{-1} es una mezcla de estiramiento y flexión que vibra a $\nu = 1.306 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 7,7 \text{ }\mu\text{m}$).

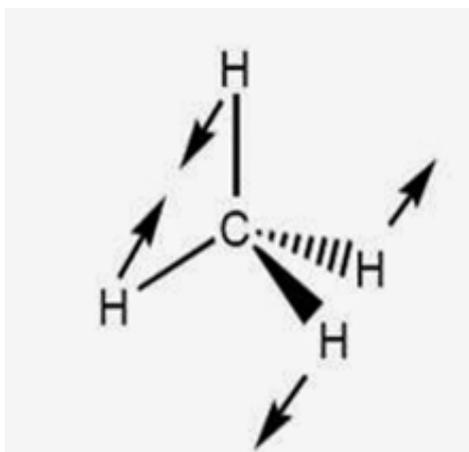


Figura 2.21. Modos de vibración de los átomos de una molécula de metano CH_4

Molécula de ozono (O_3)

La molécula de ozono forma un dipolo, al no estar alineados sus tres átomos de oxígeno. La vibración de estiramiento antisimétrico es la dominante respecto a la absorción de infrarrojos y se sitúa a $\nu = 1043 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 9,6 \text{ }\mu\text{m}$). Presenta otras contribuciones más débiles en el mismo rango de frecuencias debidas a la vibración por estiramiento simétrico (véase figura 2.22).

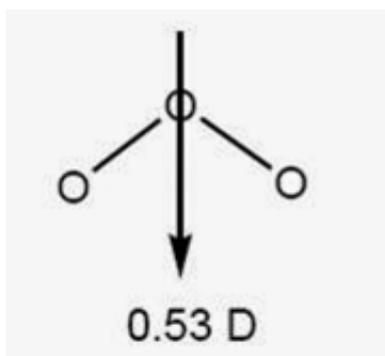


Figura 2.22. Modos de vibración de los átomos de una molécula Ozono O_3

Molécula de Óxido nitroso (N_2O)

La molécula de N_2O presenta un dipolo permanente, pero es muy débil, por lo que todas sus transiciones de rotación tienen poca importancia para la absorción de infrarrojos. Tiene tres vibraciones fundamentales: el estiramiento simétrico a $\nu = 1.285 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 7,8 \text{ }\mu\text{m}$), el antisimétrico a 2.224 cm^{-1} ($\lambda = 4,5 \text{ }\mu\text{m}$) y la vibración de flexión a 589 cm^{-1} ($\lambda = 17 \text{ }\mu\text{m}$).

Los CFCs y sus sustitutos

Los compuestos carbonados que presentan enlaces C-Cl y, especialmente C-F, tienen un potencial de inducción al calentamiento global muchos miles de veces superior al del CO₂ debido a varias razones: son muy persistentes en la atmósfera, las tensiones y flexiones caen en la ventana del espectro por lo que ninguna radiación de este rango de longitudes de onda es atrapada por los reyes del efecto invernadero (CO₂ y H₂O). Por ejemplo, la tensión C-F tiene lugar a 9 micras.

Sin embargo su efecto neto no es muy grande debido a que proporcionalmente hay muchas menos moléculas y a que parte de estos CFCs causan la destrucción del ozono enfriando así la estratosfera (al haber menos ozono, más rayos UV pasan a la atmósfera baja). Debido a que los fenómenos de calentamiento y de enfriamiento llevados a cabo por estos gases ocurren a tan diferentes altitudes, los efectos sobre el clima global son desconocidos.

2.2.7.3 Espectro de absorción de los gases de efecto invernadero

El CO₂ absorbe fuertemente en dos bandas, una localizada en 15 μm y la segunda en 5 μm, mientras que el vapor de agua lo hace en otras dos bandas, localizadas la primera en 6.3 μm y la segunda por encima de 12 μm (véase figura 2.23). El agua es el gas invernadero más importante de la atmósfera terrestre ya que produce más calentamiento invernadero que cualquier otro gas (responsable en 2/3 del efecto invernadero), aunque molécula a molécula es menos eficiente en absorber radiación que el CO₂ (contribuye al efecto invernadero en 1/4).

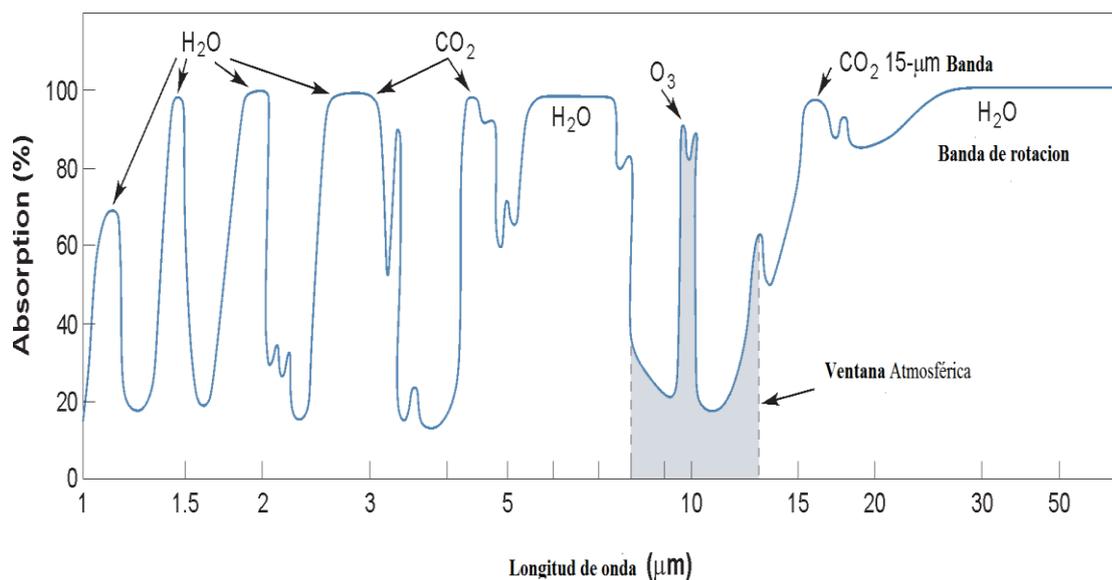


Figura 2.23. Ventana atmosférica entre las bandas de absorción del CO₂ y del H₂O. (Tomado de *forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmósfera*. Jesús Santamaría Antonio (<http://www.rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>).

Entre el espectro de dióxido de carbono y vapor de agua aparece una *ventana atmosférica* (8-13 μm) donde la emisión IR de la Tierra no es absorbida por la atmósfera y esto da un equilibrio térmico promedio que conduce al efecto invernadero natural. Es precisamente en torno a esta región, donde el resto de los constituyentes menores absorben: Ozono (banda a 9.6 μm), N₂O (bandas a 7.75, 8.52 y 16.8 μm), y los CFCs (bandas del CF₂Cl₂ a 9 y 11 μm , y CFCl₃ a 9 y 12 μm).

En síntesis se puede decir que todos los gases de efecto invernadero tienen propiedades de absorción muy diferentes. El metano (CH₄), por ejemplo, tiene un par de regiones de longitud de onda muy pequeñas en la región infrarroja en las cuales absorbe muy fuertemente, esto ocurre alrededor de los 3.5 y 8 micrones.

El espectro total de todos los gases en la atmósfera se presenta en la figura 2.24

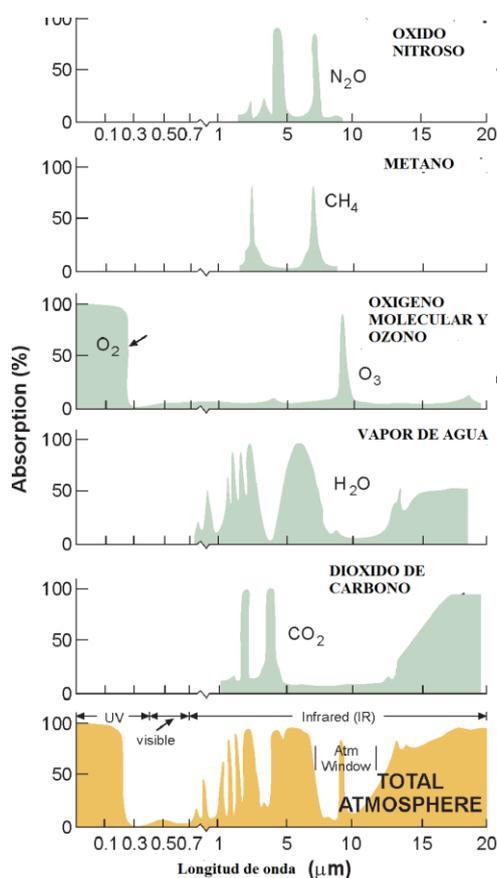


Figura 2.24. Espectros de absorción de los gases más importantes de efecto invernadero: N_2O , CH_4 , O_3 , H_2O y CO_2 . Tomado de *forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmósfera*. Jesús Santamaría Antonio (<http://www.rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>).

2.2.8 Balance energético de la Tierra y transferencia radiativa

El rápido aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (Dióxido de Carbono, Metano, Ozono, etc.) causado por la actividad humana, provoca una alteración del flujo de energía radiante en la Atmósfera (forzamiento radiactivo directo) debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre por las moléculas constitutivas de esos gases, y consecuentemente altera significativamente el balance de energía en la superficie de la Tierra (forzamiento climático).¹³

¹³ forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmósfera. Jesús Santamaría Antonio (<http://www.rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>).

El clima global está determinado por el balance radiativo del planeta. Existen tres maneras fundamentales en que se modifica el balance radiativo:

- Cambiando la radiación solar entrante por cambios en la órbita terrestre (ciclo de Milakovitch) o el albedo o en el sol (ciclos solares)
- Cambiando el albedo de la tierra (debido a cambios en el recubrimiento de las nubes, presencia de aerosoles o recubrimiento en el suelo) y
- Alterando la longitud de onda de la energía irradiada al espacio como consecuencia de los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero. El clima local depende de cómo el calor es distribuido por los vientos y las corrientes marinas.

La temperatura superficial media de la Tierra viene determinada por el balance entre la energía proveniente del Sol, principalmente a longitudes de onda de la luz visible y ultravioleta, y la energía infrarroja emitida por la superficie terrestre y la atmósfera. Ambas están modificadas por procesos ópticos y termodinámicos en la atmósfera, que incluyen, como agentes, los gases, los aerosoles y en particular al agua en sus tres fases.

El que la superficie terrestre y la atmósfera mantengan una temperatura templada se debe a la energía solar. Como anteriormente se ha mencionado el Sol y la Tierra son cuerpos calientes y como tales emiten radiación electromagnética, pudiendo aproximarse los espectros de sus radiaciones, a los de un cuerpo negro, cuyo espectro viene dado por la ley de Planck

$$B(\lambda, T) = 2hc^2/\lambda^5 \{ \exp(hc/\lambda kT) - 1 \} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

y el poder emisivo total $F(T)$ es la integral sobre las longitudes de onda

$$F(T) = \int B(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{Jm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{s}^{-1}$, es la constante de Stefan-Boltzmann y la dependencia con la cuarta potencia de T se conoce como *ley de Stefan- Boltzmann*. La temperatura efectiva (cuerpo negro equivalente) de la superficie del Sol, $T_s \sim$ es 6000 K, su radio $R_s \sim 0.7$ millones de Km y la distancia a la Tierra R_{ST} de 150 millones de Km. Aplicando la *ley de Stefan- Boltzmann*, la radiación total emitida por el Sol, E_s , será

$$E_s = 4\pi R_s^2 \cdot \sigma T_s^4 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Y el flujo de radiación solar F_s es la distancia R_{ST} conocido como constante solar, viene dado por

$$F_s = \frac{E_s}{4\pi R_{ST}^2} = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{R_{ST}} \right)^2 = 1368 \text{ Wm}^{-2} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

La fracción real de la constante solar recibida por metro cuadrado es $F_s/4$, dado que la superficie de la tierra es cuatro veces su sección eficaz. Para que la tierra este en equilibrio energético se requiere que la energía emitida por la tierra E_T dado por $4\pi R_T^2 \cdot \sigma T_T^4$ donde R_T es el radio terrestre y T_T la temperatura efectiva (cuerpo negro equivalente) de la tierra, sea igual a la recibida del sol menos la reflejada A, conocida como Albedo ($A \sim 0.3$), es decir

$$4\pi R_T^2 \cdot \sigma T_T^4 = (1 - A) \cdot F_s \pi R_T^2 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

En consecuencia, la energía solar absorbida por la tierra por unidad de área será

$$\sigma T_T^4 = F_S(1 - A)/4 \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde puede determinarse la temperatura de la tierra como cuerpo negro

$$T_T = [F_S(1 - A)/4\sigma]^{1/4} = 255 \text{ K} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Esta temperatura es muy inferior a la temperatura media de la superficie de 288 K, lo cual es debido a que la atmosfera actúa como una manta, provocando un efecto invernadero natural.

Así se puede observar que el equilibrio radiactivo depende de la constante solar F_S , del albedo planetario A y de la emisividad efectiva de la superficie de la Tierra ϵ . Un cambio en alguno de estos factores, o cualquier combinación entre ellos puede ser la causa de las variaciones en el valor de la temperatura T de la Tierra y, por lo tanto, de un cambio climático.

Anteriormente se explicaba que la energía proveniente del Sol consiste principalmente en fotones de luz visible y ultravioleta (V y UV) a los que la atmósfera es casi transparente (de ahí la importancia de la capa de ozono como protectora de los seres vivos). Sin embargo, a las longitudes de onda de emisión de la Tierra, que caen en la zona infrarroja del espectro, muchos de los constituyentes menores de la atmósfera (CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2O , O_3 , CFCs) absorben fuertemente en sus bandas de vibración-rotación, con lo cual la atmósfera es un

absorbente más efectivo de la energía que sale que de la que entra, produciendo un calentamiento neto de la tierra de ~ 33 K.

Los cuerpos reales no son perfectos emisores ni absorbentes, es decir la emisividad ε será menor que la unidad, con lo que la energía emitida $R(\lambda, T)$ será

$$R(\lambda, T) = \varepsilon B(\lambda, T) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Un modelo muy simple de efecto invernadero, basado en el balance de energía consiste en suponer la atmósfera sin estructura, es decir, como una capa isoterma a la temperatura T_T , por encima de la superficie de temperatura T_0 . El balance total de energía del sistema tierra + atmósfera será

$$F_S(1 - A)/4 = (1 - \varepsilon)\sigma T_0^4 + \varepsilon\sigma T_T^4 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Mientras que el balance de la capa atmosférica será

$$\varepsilon\sigma T_0^4 = 2\varepsilon\sigma T_T^4 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

De donde la superficie de la tierra sería $T_0 = 2^{1/4} T_T = 303$ K., valor por encima del real 288 K. Tomando el valor experimental de T_0 podemos calcular la emisividad ε en la ecuación anterior dado que

$$T_0 = [F_S(1 - A)/(4\sigma(1 - \varepsilon/2))]^{1/4} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Lo que corresponde a $\varepsilon = 0.77$ significando que la atmósfera absorbe el 77% de la radiación terrestre. El incremento de los gases de efecto invernadero hará incrementar el valor de ε conduciendo a un incremento de T_0 . Sin embargo la temperatura tiende a disminuir con un mayor albedo (ejemplo, aumento en la cubierta nubosa o en la cubierta de hielo y nieve.)

Por lo tanto para que la temperatura de la Tierra permanezca por arriba del punto de congelación, el albedo debe ser relativamente bajo y la emisividad (en infrarrojo) relativamente alta, ya que pequeños cambios en la emisividad o el albedo pueden resultar en cambios sustanciales en la temperatura de la superficie. Este es el caso cuando aumenta la concentración de gases de efecto invernadero y el calentamiento global observado.

2.2.9 Dióxido de Carbono: emisiones y tendencia

El carbono (C) es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida. Como sucede con todos los elementos, la disponibilidad de C no es infinita en el planeta y, por tanto, el Carbono circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico de manera constante. El movimiento del Carbono ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el organismo hasta el global. El carbono, en su unión molecular con el oxígeno constituye el dióxido de carbono (CO_2), gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero.

El dióxido de carbono ha sido un componente importante de la atmósfera desde hace miles de millones de años, cuando la gran actividad volcánica del planeta lo lanzaba a la atmósfera. La atmósfera primitiva era más rica en dióxido de carbono, aproximadamente una concentración de 3% contra 0.036% en la actualidad, y evitaba la salida de la radiación, produciendo junto con el vapor de agua, un calentamiento global (Lovelock, 1988). La importancia del CO₂ y el vapor de agua en la atmósfera para la regulación de la temperatura del planeta es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33 °C más fría y, por lo tanto, el planeta estaría congelado (Schlesinger 1997).

2.2.9.1 Ciclo del dióxido de carbono (CO₂)

En la Tierra existe una cantidad limitada de carbono que, como el agua, forma parte de un ciclo: el ciclo del carbono se trata de un sistema muy complejo en el que el carbono se desplaza por la atmósfera, la biosfera terrestre y los océanos.

Las plantas superiores adquieren el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico por difusión a través de pequeños poros de las hojas conocidos como estomas y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de este CO₂ regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (ppb), esta se ha estimado globalmente en 120 Pg. /año (1 Pg. [*petagramo*] = 10¹⁵ g). La mitad de la ppb (60PgC/año) se incorpora a los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO₂ debido a la respiración (respiración de los tejidos vegetales). El crecimiento anual de las plantas es el

resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado. Se le conoce como producción primaria neta (PPN) y en el nivel global se ha estimado en 60 Pg. /año.

Eventualmente, en el transcurso de pocos a muchos años, casi todo el carbono fijado por vía de la PPN regresa a la atmosfera por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa, que incluye a los descomponedores de la materia orgánica (bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros; y por la combustión en los fuegos naturales o antropogenico. Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es “respirada” a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas. Se produce así almacenes de carbono en el suelo que regresan el carbono a la atmosfera en diferentes periodos (véase figura 2 .25).

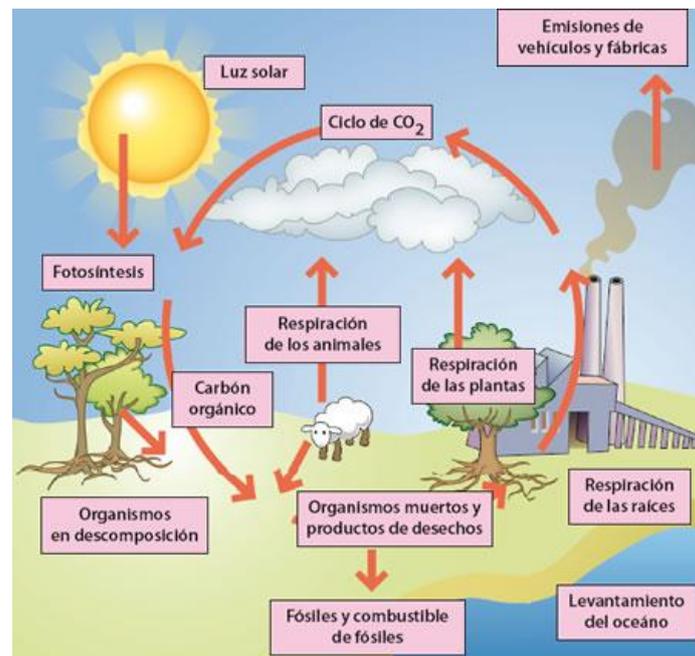


Figura 2.25. Ciclo del carbono

Los combustibles fósiles son los restos fosilizados de las plantas y animales muertos que se forman a lo largo de millones de años en determinadas condiciones, y por eso contienen una

gran cantidad de carbono. En términos generales, el carbono es el resto de los bosques enterrados, mientras que el petróleo es la vida vegetal oceánica convertida. (Los océanos absorben CO₂, que, en forma disuelta, se usa en la fotosíntesis de la vida marina.). El CO₂ puede permanecer en la atmósfera entre 50 y 200 años, en función de cómo se recicle en la tierra o en los océanos.

2.2.9.2 Relación entre la temperatura y el dióxido de carbono atmosférico CO₂

De acuerdo con el Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero correspondiente a 2011¹⁴, en el que se abordó con especial atención el ciclo del carbono, desde el inicio de la era industrial en 1750, se han emitido a la atmósfera cerca de 375 mil millones de toneladas de carbono en forma de CO₂, principalmente a consecuencia de la quema de combustibles de origen fósil. Aproximadamente, la mitad de este dióxido de carbono permanece en la atmósfera mientras que el resto es absorbido por los océanos y la biósfera terrestre.

En la figura 2.26 que se muestra a continuación se observar con mayor claridad la relación entre la temperatura y el incremento del dióxido de carbono atmosférico durante el último milenio. Se puede observar que el actual aumento de temperatura es precedido por un aumento exponencial del CO₂ atmosférico que comienza a manifestarse en el momento exacto cuando comienza la revolución industrial, a finales del siglo XVIII. Esto resulta otra evidencia de que la responsabilidad del cambio climático reside en las actividades industriales que liberan CO₂ (Gorrini, 2007).

¹⁴ http://www.wmo.int/pages/documents/ghg-bulletin_10_es.pdf

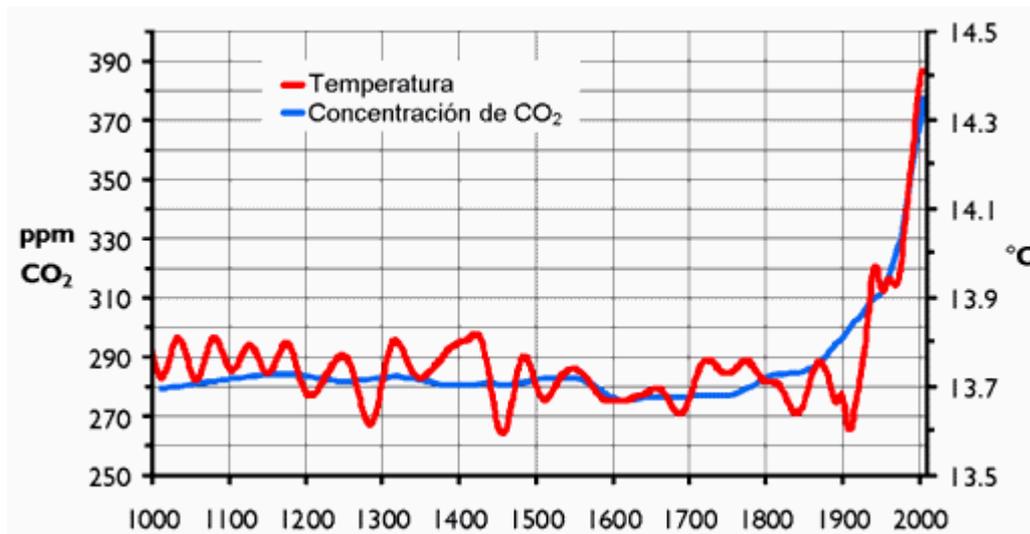


Figura 2.26. Relación de la temperatura y el CO₂ atmosférico y su evolución durante el último milenio. Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos52/cambio-climatico/cambio-climatico2.shtml>

Se estima que cada año se intercambian miles de millones de toneladas de carbono de forma natural entre la atmósfera, los océanos y la vegetación terrestre. En la actualidad, se estima que se emiten más de 25.000 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera cada año.

En grados de temperatura, se calcula que el paso de la concentración preindustrial de CO₂ a la actual (de 280 ppm a 390 ppm) ha supuesto un incremento directo de la temperatura media global de unos 0.6 °C. A largo plazo, los modelos utilizados por el IPCC predicen que la concentración de CO₂ en el 2100 estará comprendida entre las 500 ppm y 1000 ppm.

El incremento total de los gases invernadero producirá teóricamente un forzamiento radiativo de entre 4 W/m² y 9 W/m² (véase 2.27), con una subida directa media de 1.2°C, pero debido a diversos efectos de retroalimentación calculados por los diversos modelos climáticos, se estima que la subida térmica entre 1990 y el 2100 será entre 1.4°C y 5,8°C. Ya en 1896, Svante Arrhenius calculó una subida térmica de este calibre debido al aumento del CO₂. En los últimos 30 años, entre 1980 y 2010, el ritmo de subida anual ha sido de aproximadamente 0.15 °C/década, por lo que de seguir así subiría en 100 años tan sólo 1.5°C.

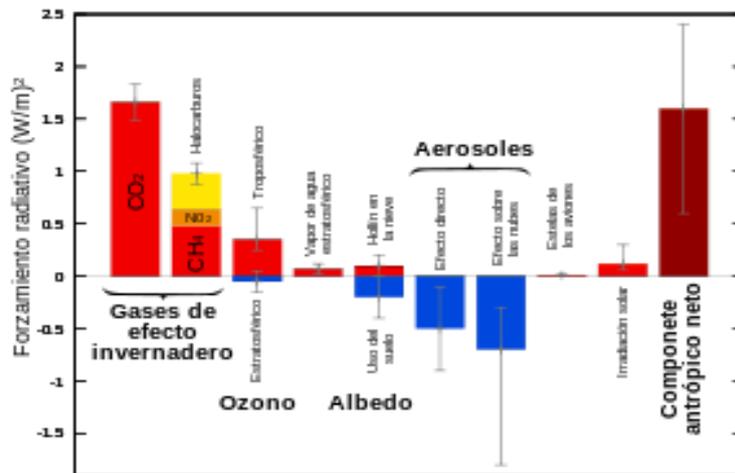


Figura 2.27. Cambio en el forzamiento radiativo entre 1750 y 2005 según las estimaciones del IPCC. Fuente: wikipedia.org.

Esta subida prevista se basa en gran medida en que se prevee que aumente la concentración de vapor de agua en la atmósfera, que es el principal agente del calentamiento. Se calcula que el impacto del vapor de agua es el 60 % del efecto invernadero que se produce en una atmósfera con cielo despejado. El feedback provocado por el incremento del vapor de agua tendrá un efecto radiativo superior al del conjunto de todos los otros gases invernadero (Karl, 2003).

2.3 MARCO METODOLÓGICO

En la troposfera terrestre, la absorción IR por moléculas como el H₂O, el CO₂, o el CH₄, entre otras, está directamente relacionada con el llamado efecto invernadero ya antes mencionado, que produce el calentamiento de la atmósfera y el cambio climático. La medición de la concentración de estos contaminantes se basa en una variante de la espectroscopia infrarroja tradicional denominada infrarrojo no dispersivo (NDIR) y que está basada en el

calentamiento de una muestra real de aire con respecto a una muestra patrón cuando ambas se iluminan con radiación infrarroja.

2.3.1 Espectroscopia infrarroja

La radiación IR fue descubierta por William Herschel a comienzos del siglo XIX. Las dificultades en construir un detector IR adecuado impidieron cualquier aplicación. Hasta los años 60 se utilizaron equipos dispersivos que utilizaban monocromadores de prisma o red. Un avance considerable se alcanzó con la introducción de la técnica de transformada de Fourier (FT-IR). Este procedimiento está basado en el interferómetro de Michelson (desarrollado inicialmente para determinar con exactitud la velocidad de la luz) y en el método del matemático francés Fourier que permite convertir la información obtenida (interferograma) en un espectro. El método de la transformada de Fourier fue utilizado en un principio por los astrónomos (década del 50) para aislar señales débiles, procedentes de estrellas distantes, del ruido de fondo ambiental.

2.3.1.1 Región infrarroja

La radiación infrarroja abarca las longitudes de onda desde aproximadamente 1 a 100 μm , que corresponde en número de ondas al intervalo 10000 a 100 cm^{-1} (esta es la unidad que se suele utilizar en espectroscopia infrarroja).

La porción infrarroja del espectro electromagnético se divide en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, así nombrados por su relación con el espectro visible. El infrarrojo lejano (aproximadamente 400-10 cm^{-1}) se encuentra adyacente a la región de microondas, posee una baja energía y puede ser usado en espectroscopia rotacional. El infrarrojo medio

(aproximadamente $4000-400\text{ cm}^{-1}$) puede ser usado para estudiar las vibraciones fundamentales y la estructura rotacional vibracional, mientras que el infrarrojo cercano ($14000-4000\text{ cm}^{-1}$) puede excitar sobretonos o vibraciones armónicas. Como anteriormente se ha mencionado, la radiación IR absorbida por las moléculas pone a éstas en estados excitados de vibración y rotación.

La región infrarroja del espectro electromagnético se extiende entre la zona del visible y la de las microondas, tal como se muestra en la figura 2.29.

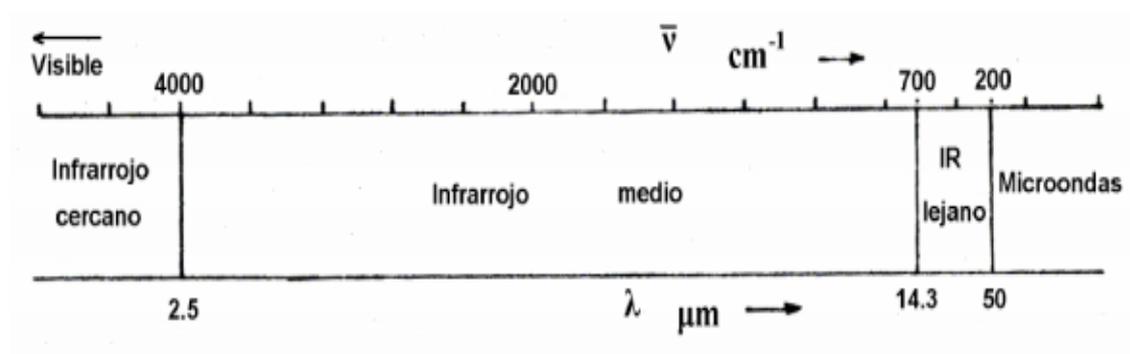


Figura 2.28 Región infrarroja del espectro electromagnético

La espectroscopia infrarroja se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias a las cuales rotan y vibran, es decir, los movimientos de rotación y vibración moleculares tienen niveles de energía discretos (modos normales vibracionales)

La interacción de la radiación infrarroja con los estados vibracionales de una molécula sólo es posible si el vector eléctrico de la radiación incidente oscila con la misma frecuencia que el momento dipolar molecular. Una vibración es infrarroja activa únicamente si el momento dipolar molecular puede ser modulado por la vibración normal.

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial q}\right)_0 \neq 0$$

(Ec. 2.17)

en donde μ es el momento dipolar molecular y q representa la coordenada normal que describe el movimiento de los átomos durante una vibración normal.

Si la condición de la ecuación 2.17 se cumple (lo cual tiene que ver con la simetría de la molécula), entonces se dice que la vibración es permitida o activa en el espectro infrarrojo; si esta ecuación no se cumple, se dice que la vibración es prohibida o inactiva.

- La absorción de la luz

La absorción de radiación infrarroja sigue las mismas leyes que las de absorción de cualquier otro tipo de radiación. Así, se puede escribir la ley de Lambert-Beer en la forma

$$T \equiv \frac{I_f}{I_0} = 10^{-\varepsilon(\lambda) \cdot [B] \cdot L} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$A \equiv \log_{10} \frac{I_0}{I_f} = \varepsilon(\lambda) \cdot [B] \cdot L = \log_{10}(1/T) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde T es la transmitancia¹⁵, A es la absorbancia¹⁶ (ambas magnitudes adimensionales), I_0 e I_f son las intensidades de radiación incidente y transmitida a una longitud de onda λ , $[B]$ es

¹⁵ La transmitancia o transmitancia es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo (potencia).

la concentración molar del analito, L es el camino óptico de la célula (m) y $\epsilon(\lambda)$ es la absorptividad molar o coeficiente de extinción molar. El coeficiente de extinción molar que se ha escrito como una función de la longitud de onda podría, igualmente, expresarse en función de la frecuencia (s^{-1}) $\nu = c/\lambda$ ó el número de ondas (cm^{-1}) $\tilde{\nu} = 1/\lambda$, siendo la velocidad de la luz $c = 299,792,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. En cualquier caso, $\epsilon(\lambda) = \epsilon(\nu) = \epsilon(\tilde{\nu})$.

2.3.1.2 El ensanchamiento de los picos

Los picos que aparecen en un espectrograma jamás son infinitamente delgados, aún si pudiéramos disponer de un espectrómetro con una resolución perfecta. A continuación se considerarán dos de los principales factores que contribuyen al ensanchamiento de los picos, así como a su forma.

- Ensanchamiento Doppler

La frecuencia de radiación emitida por una molécula depende de la velocidad de ésta relativa al detector. Si un átomo o molécula se están acercando con una velocidad, entonces la frecuencia ν_a a ν a la cual se observa la transición está relacionada con la frecuencia ν que se observaría si la molécula estuviera en reposo de acuerdo a la ecuación 2.20

$$\nu = \nu \left(1 - \frac{v_a}{c}\right)^{-1} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

En c donde es la velocidad de la luz. De acuerdo a la distribución de Maxwell existe una dispersión en los valores de ν y en consecuencia un ensanchamiento en los picos observados.

¹⁶ En espectrofotometría, la absorbancia es definida como: es la intensidad de la luz con una longitud de onda específica y que es pasada por una muestra es la intensidad de la luz antes de que entre a la muestra.

Cuando la distribución de las velocidades moleculares es de Maxwell-Boltzman, este ensanchamiento está dado por

$$v = \frac{v}{c} \left(\frac{2kT \ln 2}{m} \right)^{1/2}$$

(Ec. 2.21)

en m donde es la masa del átomo o molécula. Este ensanchamiento se manifiesta en el espectrograma en la forma de una curva gaussiana.

- Ensanchamiento por presión

Cuando existen colisiones entre átomos o moléculas que se encuentran en la fase gaseosa existe un intercambio de energía, el cual tiene como consecuencia un ensanchamiento en los niveles de energía. Si τ es el tiempo de recorrido libre entre colisiones y por cada colisión hay una transición entre dos estados, entonces habrá un ensanchamiento Δv de la transición correspondiente a

$$\Delta v = (2\pi\tau)^{-1} \quad \text{(Ec. 2.22)}$$

La ecuación 2.22 se deriva a partir del principio de incertidumbre.

2.3.1.3 Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier

Existen dos tipos de espectrómetros infrarrojos; por dispersión y por transformada de Fourier. A continuación se hará la descripción de este último, ya que éste es el tipo de espectrómetro que se dispone para la investigación.

Un espectrómetro por transformada de Fourier consta de tres elementos básicos: una fuente luminosa, un interferómetro de Michelson y un detector (véase figura 2.30).

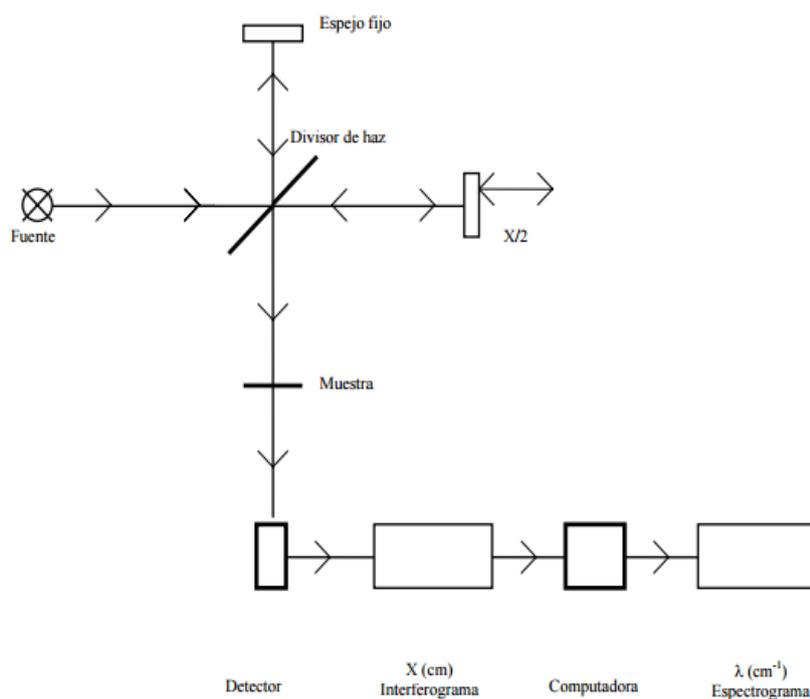


Figura 2.29 Diagrama simplificado de un espectrómetro por transformada de Fourier

Su funcionamiento es el siguiente: un haz colimado, proveniente de una fuente que emite en toda la región infrarroja, incide sobre un divisor de haz. El haz incidente se divide en dos haces perpendiculares de igual energía, uno de los cuales incide sobre el espejo móvil y el otro sobre el espejo fijo. Los haces son reflejados por ambos espejos y se recombinan al llegar al divisor de haz. Esto da lugar a una interferencia, la cual puede ser constructiva o destructiva dependiendo de la posición relativa del espejo móvil con respecto del espejo fijo.

El haz resultante pasa a través de la muestra, en donde sucede una absorción selectiva de longitudes de onda y, finalmente, llega al detector.

Inicialmente el espejo móvil se encontrará en la posición en la que la diferencia de camino óptico de los dos haces es cero. Si el espejo se desplaza una distancia $x/2$, entonces la intensidad registrada por el detector será

$$I = I_0 \cos^2(\phi/2), \text{ en donde } \phi = \frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{2\pi}{c} xv \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Si el espectro de muestra está dado por la función $B(v)$, entonces

$$I(x) = \int_0^\infty B(v) \cos^2\left(\frac{\pi}{c} xv\right) dv = \frac{1}{2} \int_0^\infty B(v) (1 + \cos\left(\frac{2\pi}{c} xv\right)) dv \quad (\text{Ec. 2.24})$$

La parte de esta expresión que depende de x es llamada interferograma

$$J(x) = \frac{1}{2} \int_0^\infty B(v) \cos\left(\frac{2\pi}{c} xv\right) dv \quad (\text{Ec. 2.25})$$

El espectro $B(v)$ puede ser calculado a partir del interferograma $J(v)$ como la transformada coseno de Fourier

$$B(x) \propto \int_0^\infty J(x) \cos\left(\frac{2\pi}{c} xv\right) dx \quad (\text{Ec. 2.26})$$

La información recabada por el detector se utiliza para obtener el interferograma, el cual es digitalizado. Una computadora desarrolla el cálculo aproximado de la transformada de Fourier del interferograma, debido a que después de digitalizar la información ya no se puede

trabajar con variables continuas. Es decir, la distancia x y la frecuencia ν pasan a ser variables discretas $n\Delta x$ y $k\Delta \nu$;

$$B(k\Delta \nu) = \sum_{n=0}^{N-1} J(n\Delta x) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{c} n\Delta x \cdot k\Delta \nu\right) \quad (\text{Ec. 2.27})$$

La grafica de $B(k\Delta \nu)$ contra $k\Delta \nu$ corresponde al espectrograma digitalizado, y es desplegada en la pantalla de una computadora.

Los espectrómetros por transformada de Fourier poseen ciertas ventajas con respecto a los espectrómetros dispersivos:

a) El tiempo requerido para obtener un espectrograma es muy corto comparado con los espectrómetros dispersivos. La señal del interferograma se conoce como señal “multiplex” porque el detector hace una lectura de todas las frecuencias de manera simultánea. Como resultado de esto se pueden lograr espectrogramas, de una resolución aceptable, en tiempos del orden de segundos; mientras que los espectrómetros dispersivos requieren de diez a quince minutos.

b) No se necesitan rendijas que limitan la cantidad de energía que llega al detector. En los espectrómetros dispersivos éstas son necesarias para dar mayor resolución. Así que, en los espectrómetros por transformada de Fourier, llega al detector una cantidad mayor de radiación, lo cual resulta en una mayor sensibilidad del mismo.

c) La muestra no se encuentra inmediatamente después de la fuente, por lo cual se calienta mucho menos que en los espectrómetros de dispersión.

d) En el espectrograma no aparecen las contribuciones por emisión de la muestra. En un espectrómetro por transformada de Fourier, el detector responde a las frecuencias que son moduladas al pasar por el interferómetro. La muestra, casi siempre, se encuentra después del interferómetro y antes del detector. Por lo tanto la radiación que podría ser emitida por la muestra no es modulada y, en consecuencia, no es detectada. Como resultado, no aparecen bandas de emisión en el espectrograma. Tampoco se detecta luz parásita, de tal forma que no es necesario trabajar con condiciones de iluminación especiales.

2.3.2 Espectrometro infrarrojo no dispersivo licor LI-820 (NDIR)

La operación del espectrometro infrarrojo dual se basa en una fuente IR de banda ancha y un detector piroelectrico cuyo funcionamiento se debe a la energía térmica recibida.

Los componentes principales del equipo de medición (véase Figura 2.31) son: el NDIR propiamente dicho, una fuente de luz infrarroja (lámpara), tubo chapado en oro (trayectoria óptica) por donde circula la muestra (véase figura 2.31a), un filtro de longitud de onda, y el detector de luz infrarroja. En un extremo del tubo (trayectoria óptica) está la fuente de luz y en el otro extremo los dos sensores, uno con filtro de 4,26 μm para CO_2 (este filtro corresponde a la banda de absorción de CO_2) y el otro de 3.95 μm simplemente como referencia de la intensidad de luz emitida (para compensar automáticamente el envejecimiento de la lámpara). A esta configuración la llamamos espectrometro infrarrojo dual.

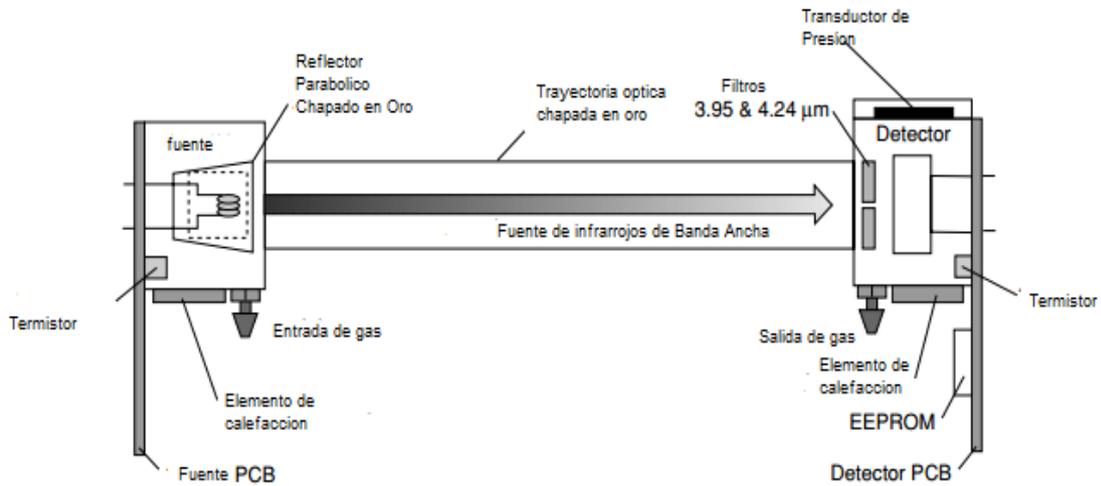


Figura 2.30. Diagrama esquemático del sensor dual LI-820. Fuente: *LI-820 CO₂ Analyzer instruction manual*. Nebraska, USA. Copyright 2002, LI-COR, Inc. Publication Number 984-06557. [Documento electrónico].¹⁷



Figura 2.31. Trayectoria óptica, 14 cm. El gas se bombea (o difunde) a través de este dispositivo, el cual está enchapado en oro para aumentar la transmisión de la energía. Fuente: the li-820 CO₂ gas analyzer, Brochure.

El gas es succionado por la cámara de acumulación y se bombea (o difunde) a la trayectoria óptica (o tubo de luz) de la muestra (Fig. 2.31a)¹⁸. Los rayos IR radiados desde la fuente de

¹⁷ <<http://www.eol.ucar.edu/homes/stephens/RACCOON/AIRCOADIST/AUXPDFs/LI820Manual.pdf>>.

¹⁸ y la concentración de gas se mide electro-ópticamente por la absorción de una determinada longitud de onda en el infrarrojo (IR)

luz se convierten en luz intermitente debido a que la fuente está montada en un reflector parabólico que corta el haz, esto es necesario para colimar la luz y aumentar la energía a lo largo de la trayectoria óptica del detector. Cuando los rayos IR que pasan a través de la trayectoria óptica son absorbidos por el CO_2 , se produce una diferencia en la cantidad de luz de los rayos IR que entran en la célula de detección. esta variación genera una señal eléctrica de salida que es la que se detecta. Cuando la concentración de CO_2 en la célula de muestreo es cero, el detector verá la máxima intensidad de luz. Cuando la concentración de CO_2 aumenta, la intensidad de la luz detectada disminuye. (El detector tiene un filtro óptico frente a él que elimina toda la luz, salvo la longitud de onda que pueden absorber las moléculas del gas seleccionado).

La disminución de luz que se experimenta depende directamente del n° de moléculas de CO_2 que se encuentran entre el emisor de luz y el espectrometro. La ley de Lambert and Beer explica el fenómeno (Ec. 2.28):

$$I = I_0 * e^{-kcs} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

I_0 : es la luz a la salida del sensor.

K : un coeficiente de absorción

C : es el n° de partículas

S : es la absorción

Lo ideal sería que las moléculas de otro tipo de gas no absorbieran la luz de esa longitud de onda, y no afectasen a la cantidad de luz que llega al detector.

En términos generales la medición de CO_2 , es una función de la absorción de energía IR, mientras esta viaja a través de la trayectoria óptica. Las mediciones se basan en el cociente de la absorción IR de una señal de referencia y de una muestra.

El instrumento utiliza técnicas de procesamiento digital de señales para determinar la temperatura y presión corregida, la concentración de CO_2 está basada en las señales del banco óptica mediante el uso de una técnica de relación. Los datos se transmiten a través de un polinomio de orden 6 que realiza la linealización de la señal del detector a una fracción molar mezclando la proporción del CO_2 en aire dado en μmol de CO_2 por mol de aire, o ppm.

La salida de datos se proporciona en formato digital a través de una interfaz RS-232 que admite conexión a un ordenador externo. El instrumento viene con una aplicación Windows compatible con 95/98/NT/2000/XP/ME para la configuración del equipo, control de datos, colección y exhibición. Las señales analógicas están disponibles a través de un bloque de terminales de colección de un registrador de datos o medios semejantes. El instrumento tiene una trayectoria óptica intercambiable que permite diferenciar los diferentes rangos de concentración según los requisitos que son requeridos para una aplicación en particular.

2.3.3 Método de la cámara de acumulación

En el comienzo las mediciones de flujo desde el suelo para CO_2 y otros gases (p.e., NO_2 y CH_4) mediante el método de la cámara de acumulación han sido desarrolladas específicamente para la determinación de la respiración de suelos relacionados con cultivos

agrícolas (Hutchinson y Mosier de 1981; Chan et al, 1988; Mitra et al. 1999) y numerosas configuraciones de cámara han sido propuestas (Rolston, 1986)¹⁹.

El instrumento utilizado en la investigación consta de los siguientes dispositivos (Figura 2.32):

- a) Una cámara circular invertida (CA),
- b) Espectrofotómetro infrarrojo (IR) para medir la concentración de CO₂ ;
- c) Un convertidor de analógico-digital (AD);
- d) Un ordenador portátil

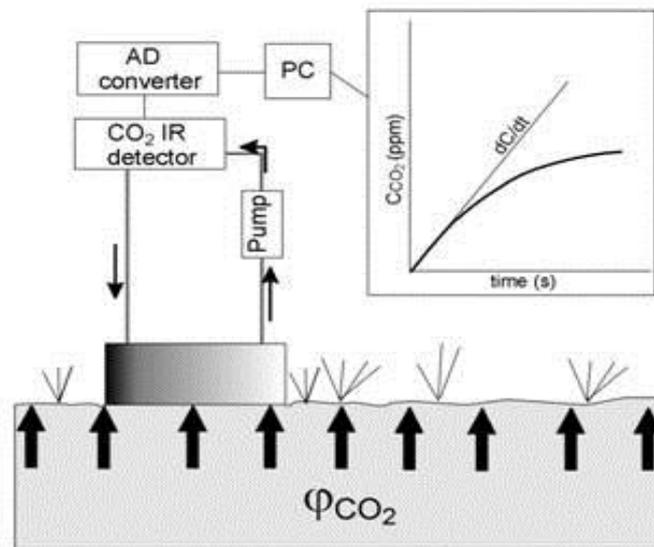


Figura 2.32. Técnica de la cámara de acumulación utilizada para medir concentración de CO₂. La técnica de la cámara cerrada que se muestra en el esquema es la se utiliza en el monitoreo volcánico para medir el flujo de gases volcánicos (Dióxido de Carbono (CO₂), Sulfuro de Hidrogeno (H₂S), etc...) fuente:

<http://ipf.ov.ingv.it/geoco2/accumulo.htm>.

¹⁹ <http://ipf.ov.ingv.it/geoco2/accumulo.htm>

La cámara se posiciona en el suelo donde el gas es recibido y posteriormente enviado al espectrometro IR, y luego es inyectado nuevamente a la cámara.

Los valores de concentración de CO₂ dentro de la cámara son adquiridos por el conversor AD y son enviados a la computadora de bolsillo; que muestran un gráfico de la concentración de CO₂ vs el tiempo promedio desarrollado por el software. A partir de esta grafica se calcula la pendiente inicial $dCO_2/dt = \alpha$. En el tiempo inicial, α es directamente proporcional a la concentración de CO₂ capturada en el suelo. Para entender la relación entre α y el flujo de CO₂ de referencia, debe hacerse referencia a la ecuación de balance de masa de CO₂ en la cámara de acumulación.

La masa de CO₂ dentro de la cámara de acumulación en el tiempo $t + dt$ es igual a la masa de CO₂ presente en el tiempo t , más la masa de CO₂ entrando en la cámara de acumulación en el intervalo de tiempo dt , menos la masa de CO₂ saliendo de la cámara de acumulación en el mismo intervalo de tiempo.

En términos matemáticos esto es:

$$VC_{t+dt} = VC_t + C_S F_S S dt - C_t F_S S dt \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde C_t es la concentración de CO₂ en la AC en el tiempo, C_{t+dt} es la concentración de CO₂ en el tiempo $t + dt$, C_S es la concentración de CO₂ que está entrando desde el suelo a través de la cámara F_S , se asume que en cada momento hay un flujo que corresponde al aire atmosférico, de la concentración de CO₂ C_t , saliendo por debajo de las paredes de la cámara de acumulación, como no hay presurización, se lleva a cabo dentro de la cámara de acumulación.

$$V \frac{dC}{dt} = F_S S (C_S - C_t) \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Para la condición inicial, $t = 0$ y $C_t = C_0$, donde C_0 es la concentración de CO_2 en la atmosfera, y por lo tanto la ecuación 2.30 puede ser reescrita como:

$$F_S (C_S - C_0) = \frac{V}{S} \left(\frac{dC}{dt} \right)_{t \rightarrow 0} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Considerando que para esta aplicación $C_S \gg C_0$, y por lo tanto la ecuación 2.31 se convierte en:

$$F_S C_S = \frac{V}{S} \left(\frac{dC}{dt} \right)_{t \rightarrow 0} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Los terminos $F_S C_S$ representa la concentracion de CO_2 tomado desde el suelo (φ_{CO_2}) y el termino dC/dt es la pendiente inicial, α , de la curva reportada por el palmtop. Utilizando esta notacion, la ecuacion 2.32 se puede escribir como:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = \frac{V}{S} \quad (\text{Ec.2.33})$$

CAPÍTULO III

SISTEMA DE HIPÓTESIS

3 SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 . FORMULACIÑÓN DE HIPÓTESIS

Las fuentes móviles que circulan sobre el sector norte del mercado central de san miguel están emitiendo gases que están incrementando la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera.

3.2 VARIABLES

3.2.1 Variable independiente

- Posición

Lugar donde se toma la muestra (Sector norte del mercado central de San Miguel: tomando diversos puntos de muestreo sobre la intersección de la 2ª calle poniente y 3ª avenida norte y sobre la 4ta calle poniente, entre la 1ª y 3ª avenida norte.)

- Tiempo

El periodo en que son tomadas las muestras

3.2.2 Variable dependiente

- Concentración de dióxido de carbono

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4 MARCO METODOLÓGICO

4.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA

El Mercado Municipal está ubicado entre la 1ª av. Sur, la 1ª calle poniente y la 3ª av. Sur y calle chaparrastique y colinda en su mayoría con locales comerciales. Actualmente cuenta con alrededor de 959 puestos sin tener en cuenta la gran cantidad de puestos informales o ventas ambulantes que se encuentran instaladas en las aceras y avenidas del centro urbano (figura 4.1).



Figura 4.1. Ubicación geográfica del mercado central de San Miguel, y área de estudio seleccionado. (Extraído y modificado de anteproyecto de diseño arquitectónico del mercado municipal 3 y 4, presentado por Miriam Elizabeth Argueta Sorto José Luis Rivas López, departamento de arquitectura UES FMO).

El área de estudio que ha sido seleccionada para efectuar la investigación comprende puntos de muestreo ubicados sobre la 2ª y 4ª calle poniente. En la figura 4.2 se presenta gráficamente y con más detalle la ubicación geográfica del área de estudio mencionada.



Figura 4.2. Ubicación geográfica del sector norte del mercado central de San Miguel, las líneas rojas representan los puntos donde se efectuó el proceso de muestreo de CO₂. Fuente: Google earth maps.

4.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de tipo campo-exploratoria

Es exploratoria debido a que aún no se han realizado investigaciones sobre cuantificación de concentración de CO₂ atmosférico en el área de estudio

seleccionada, por lo que esta investigación podría servir como referencia para otros investigadores que aborden temáticas similares en el futuro.

De campo: ya que se estudió el fenómeno en el escenario natural donde se manifestaba. Las mediciones del trabajo se llevaron a cabo en el sector norte de mercado municipal, específicamente en la 2ª y 4ª Calle Poniente donde circulan una gran cantidad de fuentes móviles en horas del mediodía lo cual propicio las condiciones necesarias para llevar a cabo esta investigación.

4.2.1 Nivel de la investigación

Cuantitativa y transversal

El nivel de la investigación es cuantitativa debido a que el objetivo principal consiste en efectuar mediciones de concentración de CO₂. En otras palabras se trata de recoger y analizar datos sobre emisiones de CO₂ atmosférico.

Transversal: debido a que la investigación tiene un límite de tiempo para su desarrollo es decir no se le dará seguimiento.

4.3 POBLACION

Fuentes móviles en el sector norte del mercado de San Miguel.

4.3.1 Muestra

Fuentes móviles que transitan sobre la intersección de la 2a calle poniente y 3ª avenida norte y sobre puntos seleccionados aleatoriamente ubicados sobre la 4a calle poniente, entre la 1ª y 3ª avenida norte del sector norte del mercado central de San Miguel, la toma de muestras se efectuó de lunes a viernes en un periodo de tiempo que comprende entre 11:30 am y 12:45 pm

4.4 INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

El detalle y la función de los componentes del equipo que se utilizó para efectuar la cuantificación de CO₂ se presenta a continuación:

- El detector LICOR de CO₂ LI-820 (véase figura 4.3), es un analizador de una vía, de doble longitud de onda, no dispersivo. Entrega una concentración absoluta de CO₂ en ppm con una frecuencia mínima de 0,5 segundos. Esta concentración es función de la absorción de energía infrarroja cuando ésta pasa a través del lector óptico.

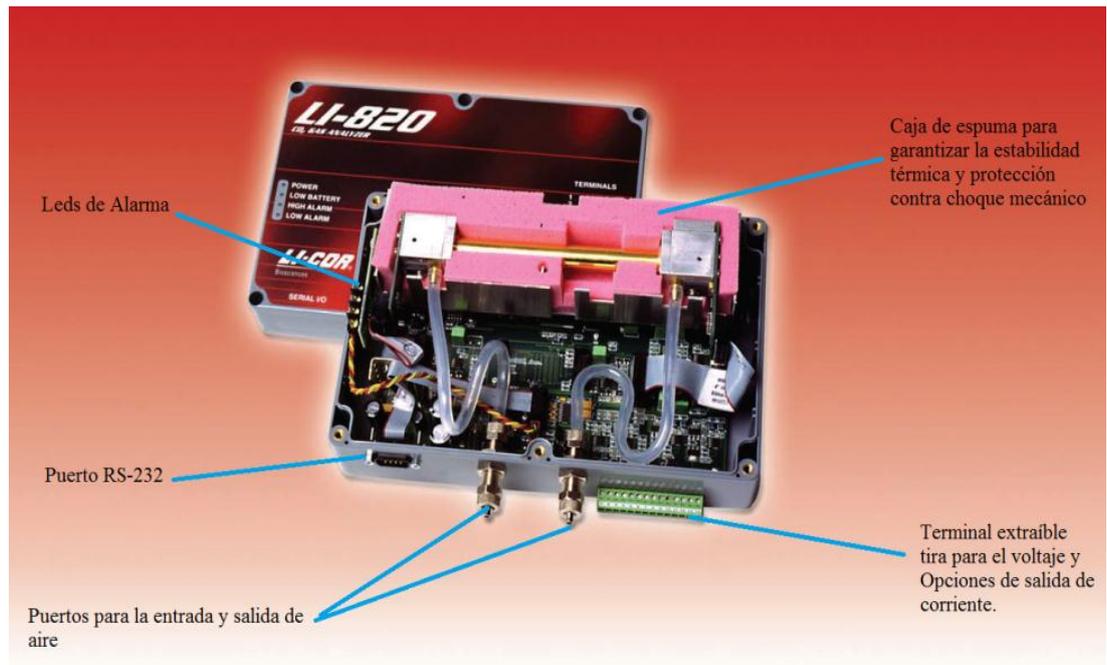


Figura 4.3 Esquema del espectrometro LICOR LI-820. Fuente: Portable diffuse flux meter LI820 Carbon dioxide, handbook 2006, manual.

El algoritmo del instrumento, además corrige la concentración de CO_2 con los datos de presión y temperatura internas. La exactitud del sistema de acumulación está estimada en 12.5% debido a la alteración del flujo de gas por el bombeo del sistema (Evans et al., 2001, extraído de Lewicki et al., 2005). La precisión es $\pm 3\%$ (Portable diffuse flux meter LI820 Carbon dioxide, handbook 2006).

- Los filtros son 2. El primero, sirve para eliminar partículas de polvo, proporcionado por LICOR. El segundo compuesto por sales de sílica gel, tiene por objetivo eliminar la humedad del gas que ingresa al detector, ya que puede

dañarlo y ocasionar interferencia analítica por condensación de agua (Portable diffuse flux meter LI-820 Carbon dioxide, handbook, 2006).

- La bomba de aire (véase figura 4.4) es catalogada como microbomba de diafragma con un flujo nominal de $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$. y un sistema de alimentación de 150 mA (12 Voltios), diámetro de guarniciones neumáticas 4 mm. Su función es hacer circular continuamente el aire desde la cámara hasta el analizador de CO_2 . Modelo ANR 50020972 Manufacturer ASF THOMAS, West Germany (Portable diffuse flux meter LI820 Carbon dioxide, handbook, 2006).

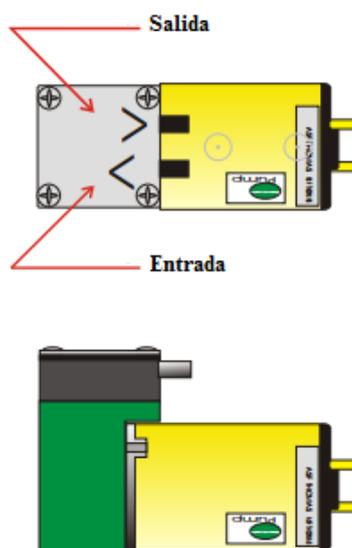


Figura 4.4. Esquema de la bomba de aire, fuente: Portable diffuse flux meter LI820 Carbon dioxide, handbook 2006, manual.

- El computador portátil (figura 4.5) consiste en una palmtop IPAQ PocketPC marca HP, RISC de 32-bit procesador 206 MHz Intel StrongARMSA-1110, memoria: 16 MB SDRAM, memoria flash de 16 MB, suministro de 950 mAh de

polímero de litio recargable de la energía base de acoplamiento o adaptador de CA, vida de batería estimada: 14 horas. Se utilizó el software creado por la empresa LICOR, software de comunicación LI-820 Palmflux para registrar y transferir los datos desde el analizador hasta el computador (Manual LI-820).



Figura 4.5. Esquema del computador portátil utilizado. IPAQ PocketPC marca HP

- Cámara de acumulación, cuenta con las siguientes especificaciones:
 - ✓ Diámetro interno: 0.2 metros (200 mm)
 - ✓ Altura interna: 0.097 metros (97 mm)
 - ✓ Volumen interno (neto): $3.01440 \times 10^{-03} \text{ m}^3$
 - ✓ Volumen muerto: tubos, filtros y detector de la célula volumen $4.84588 \times 10^{-05} \text{ m}^3$.
 - ✓ Volumen neto global: $3.06286 \times 10^{-03} \text{ m}^3$.
 - ✓ Área neta: 0.0314 m^2 .
 - ✓ Masa: 1.650 kilogramos

En la figura 4.6 se muestra la apariencia física de la cámara de acumulación.



Figura 4.6. Cámara de acumulación. (a) Vista interna de la cámara (b) Vista de perfil

A través de la cámara de acumulación circula el aire que es extraído del medio, y se hace circular mediante la bomba previamente descrita, la cual lo lleva por una manguera hacia un espectrofotómetro (NDIR) y luego regresa a la cámara por otra manguera e inicia nuevamente en un proceso cíclico. El gas de suelo circula entre la cámara y el NDIR.

- Adaptador RS 485.
- La batería del equipo es de tipo MAKITA 1434 Ni-MH (figura 4.7), con un voltaje nominal de 14.4, la capacidad nominal es de 2.6 A/h, la duración nominal de la batería es de aproximadamente 4 horas, tamaño de la batería: 100 x 93 x 94 mm Masa: 810 gramos (la batería debe ser de 12 V y 12 Ah de corriente continua, capaz de entregar energía al analizador y a la bomba de aire durante

todo un día de medición.). Portable diffuse flux meter LI820 Carbon Dioxide, handbook,²⁰ 2006.



Figura 4.7. Esquema de la batería. Fuente: Portable diffuse flux meter LI820 Carbon dioxide, handbook 2006, manual.

En la figura 4.8 se muestra el esquema del equipo completo en planta.

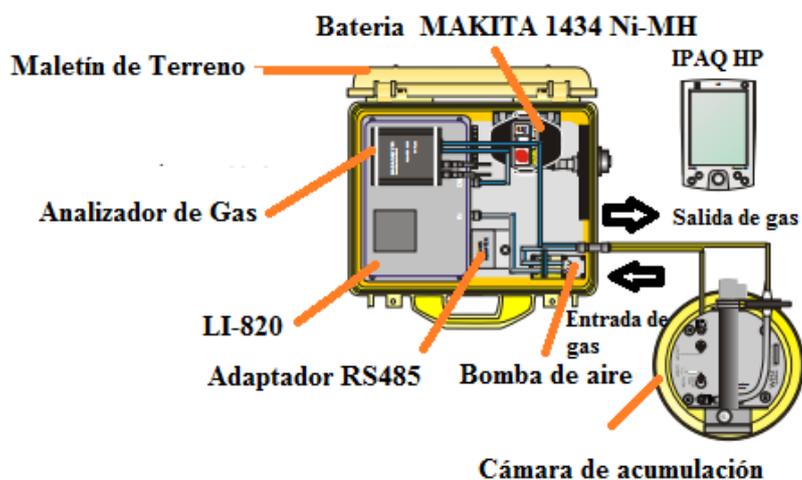


Figura 4.8. Sistema de cámara de acumulación como medidor de concentración y flujo de CO₂.

Visión en planta (extraído y modificado de <http://www.westsystems.com>)²¹

¹⁹<http://www.westsystems.com/documentation/LICOR%20FluxMeter%20handbook.pdf>

²¹<http://www.westsystems.com/documentation/LICOR%20FluxMeter%20handbook.pdf>

4.4.1 Método utilizado para la cuantificación de dióxido de carbono

Este método consistió en el registro de la concentración del CO_2 , debido a la acumulación de gas en el interior de una cámara cilíndrica que se coloca con su extremo abierto sobre la superficie del suelo cuando se mide flujo de gases especialmente cuando la técnica se utiliza en el monitoreo volcánico. Pero el objetivo de esta investigación era medir concentración de CO_2 en el ambiente y no flujo en una fumarola, por tanto la cámara se posiciono con su extremo abierto en contacto con el aire, como se muestra en la figura 4.9.

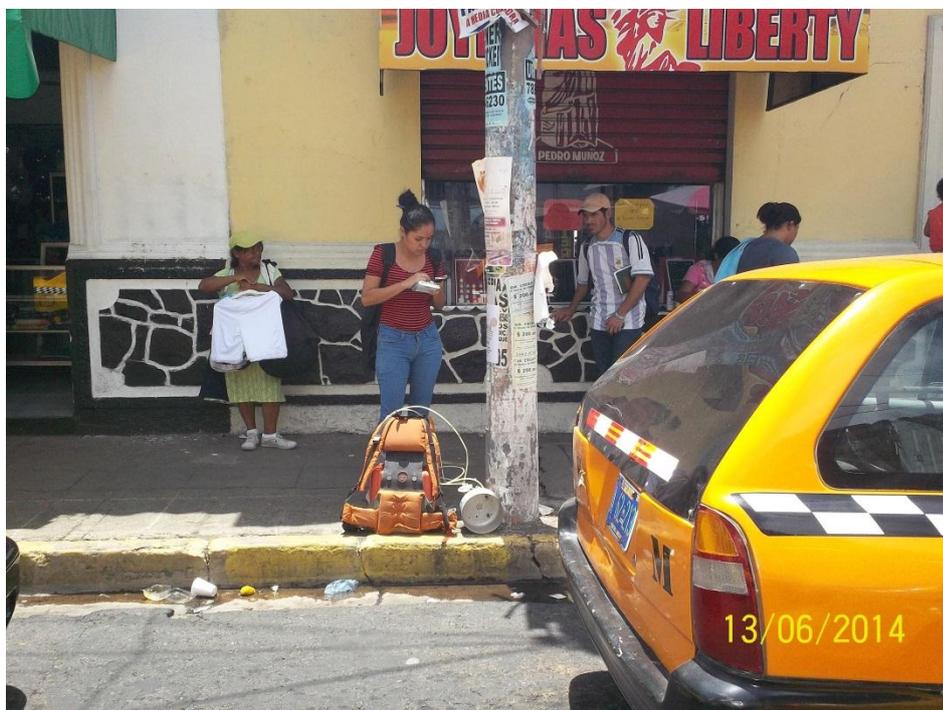


Figura 4.9 Recolección de muestras de concentración de dióxido de carbono atmosférico emitido por fuentes móviles que circulan sobre la 2ª calle poniente.

El instrumento cuenta con una bomba eléctrica que succiona el aire atmosférico para llevarlo al espectrofotómetro (NDIR) y analizarlo; luego lo regresa a la atmosfera por un circuito de mangueras.

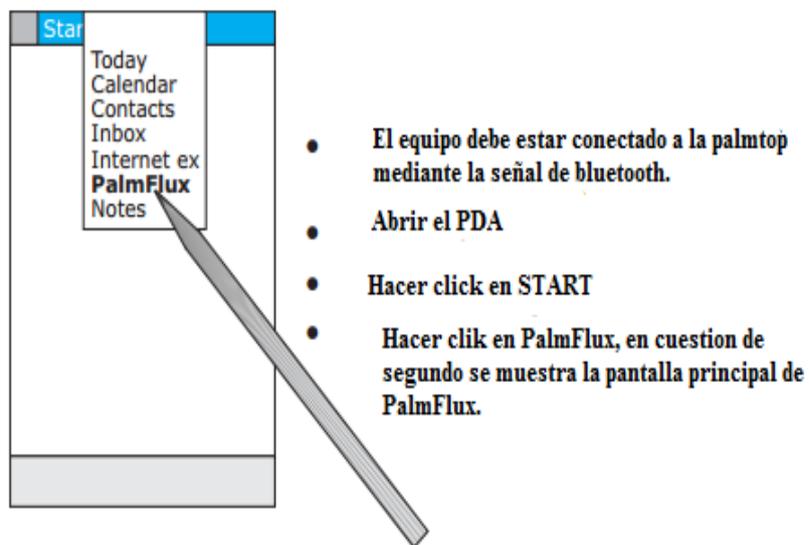
4.4.2 Procedimiento general para la toma de muestras de dióxido de carbono

A continuación se enumeraran los pasos que se completaron para realizar la medición de la concentración de CO₂ :

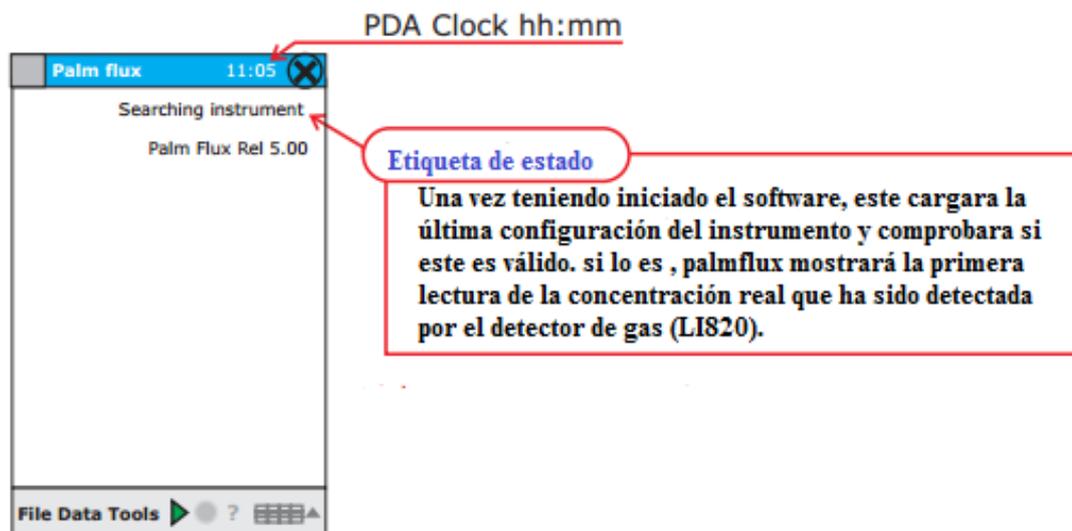
- 1 Se realizó la conexión de las mangueras de la cámara de acumulación, asegurándose que las conexiones de entrada y salida al detector sean las correctas y que además queden muy bien colocadas para evitar la fuga de aire o que las mangueras se desconecten en el momento del proceso de medición.
- 2 Se colocó correctamente la batería recargable del detector que fue previamente cargada.
- 3 Se activaron los interruptores de encendido del detector y de la palm (PC de bolsillo) y se esperó hasta que se observar la señal de un LED en el espectrofotómetro que indica que se encuentra listo para empezar a medir. Es necesario dejar que el equipo se estabilice al menos durante 5 minutos, para comenzar a efectuar el primer muestreo debido a que podría haber gas

acumulado en el sistema que podría dar como resultado datos erróneos y también porque existe una serie de perturbaciones en el ambiente que también podría afectar el sistema y generar confusión al tomar los primeros datos.

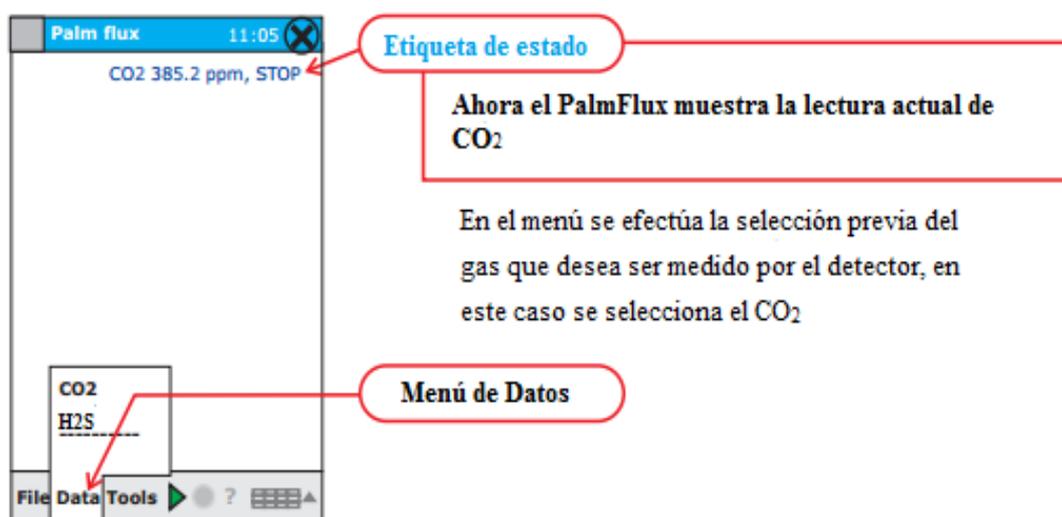
- 4 El equipo debe estar encendido y conectado a la palmtop (PC de bolsillo) mediante la señal de bluetooth, luego se abrió la carpeta que contiene el archivo del programa Palmflux, como se muestra en la figura 4.10a



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10. (a) Descripción grafica del procedimiento de activación del programa Palmflux antes de efectuar el proceso de medición. (b) Pantalla de inicio, la cual muestra la última configuración del equipo. (c) Etiqueta de estado que muestra la lectura actual del tipo de gas que se ha seleccionado, en

este caso el CO₂. Figura tomada y modificada de Carbon dioxide flux meter Handbook. First released edition: 5.01 Pisa, Italy, October 31, 2003. [Documento electrónico].

A continuación en la figura 4.11 se muestran las curvas que corresponden al flujo del gas que estaba siendo medido, y se explica con detalle el significado de cada dato que se desplegó en la pantalla durante el proceso de medición.

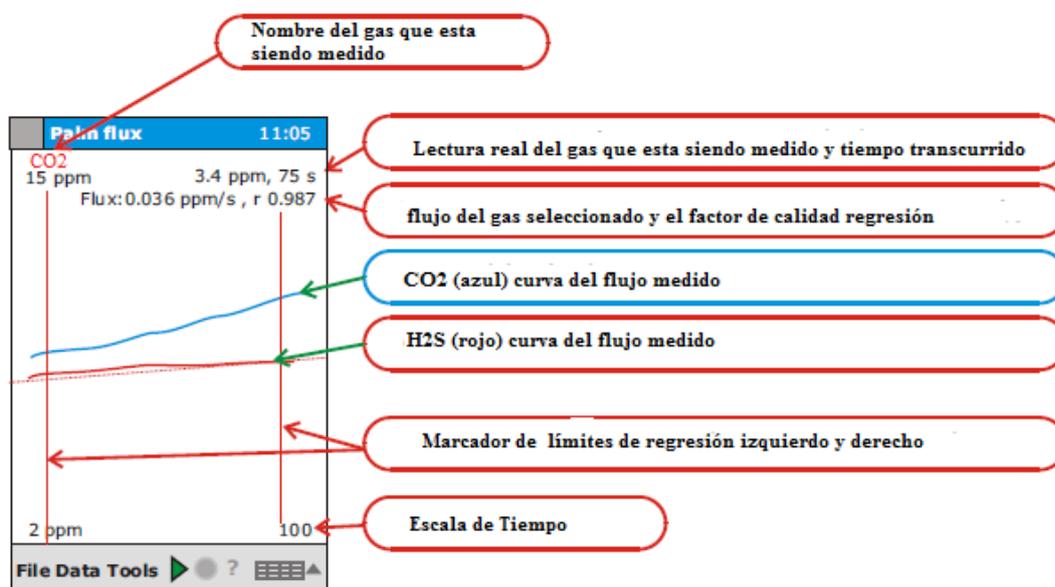


Figura 4.11: Detalle general de los datos, curvas y rectas paralelas que se muestran en la pantalla una vez iniciado el programa. Figuras tomadas y modificadas de Carbon dioxide flux meter Handbook.

First released edition: 5.01 Pisa, Italy, October 31, 2003. [Documento electrónico].

Durante la medición se muestran ambas curvas del flujo tanto del CO₂ como del H₂S que es el otro gas que puede ser medido por el detector.

El máximo de la escala de concentración y los valores mínimos, así como el factor de calidad de flujo y la regresión se refiere al gas de destino seleccionado.

En la figura 4.12 se muestra un esquema que resume el proceso de medición que se efectuó.

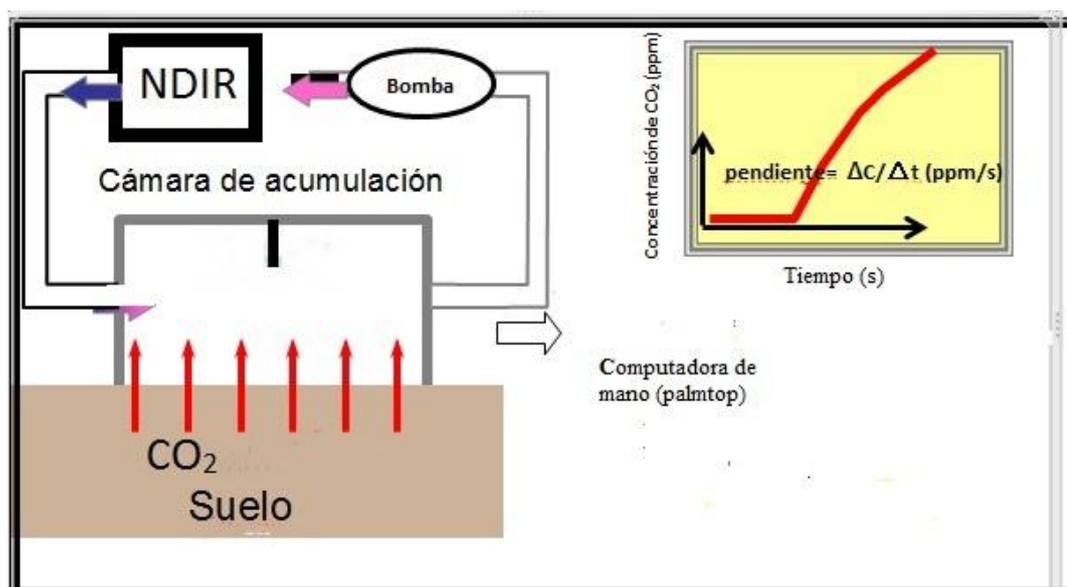


Figura 4.12. Esquema de proceso de medición de CO₂ en suelo utilizando el sistema de cámara de acumulación. Tomado y modificado de trabajo de tesina elaborado por OLMOS, GUEVARA, Rodolfo A. “*Distribución espacial de flujo de dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el volcán San Miguel*”.

En el momento en que la cámara está detectando la mezcla de gases que fue emitida a la atmósfera por los tubos de escape de las fuentes móviles (la medición no es instantánea debido a que la circulación del aire a través del sistema debe durar de 2 a 3 minutos, hasta que el analizador haya alcanzado una cota máxima) el software

comienza a registrar los datos de concentración de CO₂, y el resultado fue una curva como la que se muestra en la figura 4.13 la cual representa el flujo de CO₂, los valores de la concentración son bastante fluctuantes por lo que en este trabajo se registra solamente el máximo de la curva durante cada muestreo. Este mismo proceso de muestreo se repitió tomándose alrededor de 20 valores diarios durante un tiempo de 2 horas que correspondían a las horas del mediodía (horas de mayor circulación vehicular).

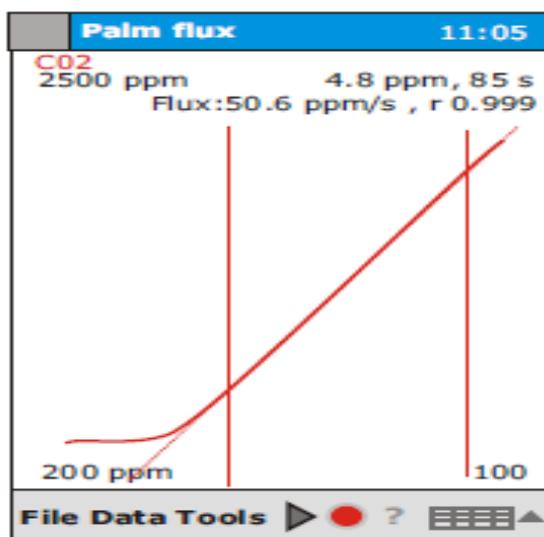


Figura 4.13. Curva característica del flujo de CO₂²²

Al finalizar el proceso de muestreo, se seleccionó en la palm la opción **File**, eligiendo la opción **Exit**, donde se cierra automáticamente el programa y se apaga el detector.

²² Carbon dioxide flux meter Handbook. First released edition: 5.01 Pisa, Italy, October 31, 2003. [Documento electrónico].

<http://www.westsystems.com/documentation/HandBook%205_01_28_November2003.pdf>

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN Y

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 CONCENTRACIÓN PROMEDIO DIARIA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN EL SECTOR NORTE DEL MERCADO CENTRAL DE SAN MIGUEL

Los valores de la concentración promedio diaria de Dióxido de Carbono (CO₂) atmosférico que son emitidos por fuentes móviles en el sector norte del mercado central de San Miguel, están todos por encima del valor promedio estándar (360 ppm) que ha sido medido previamente en el campus de la universidad de El Salvador sede oriente. La tendencia de la emisión diaria de Dióxido de Carbono que ha sido cuantificada se muestra en la figura 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, para los meses de marzo, abril, mayo y junio respectivamente.

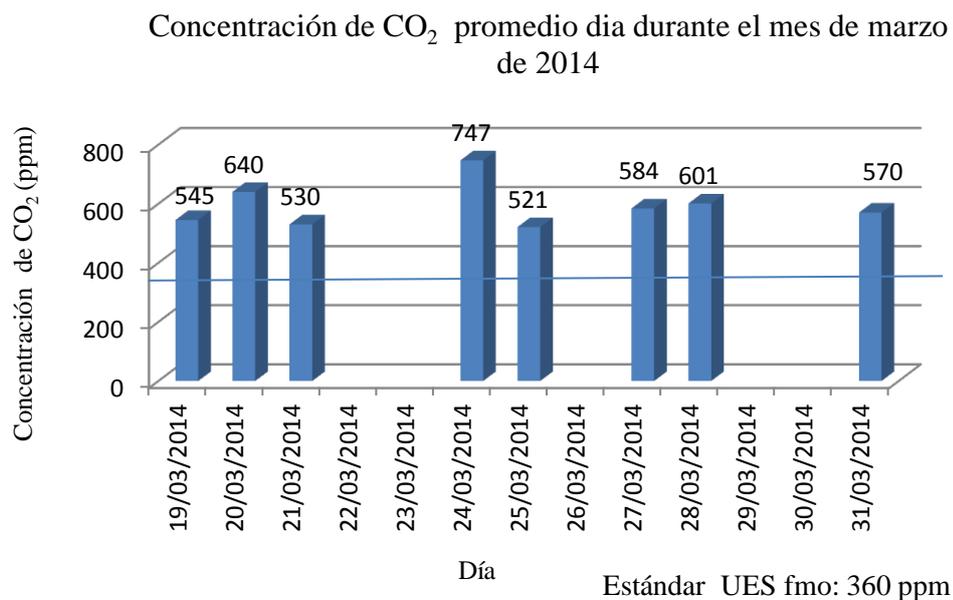


Figura 5.1. Medida de la concentración promedio diaria de CO₂ durante el mes de marzo de 2014 en el sector norte del mercado central de San Miguel.

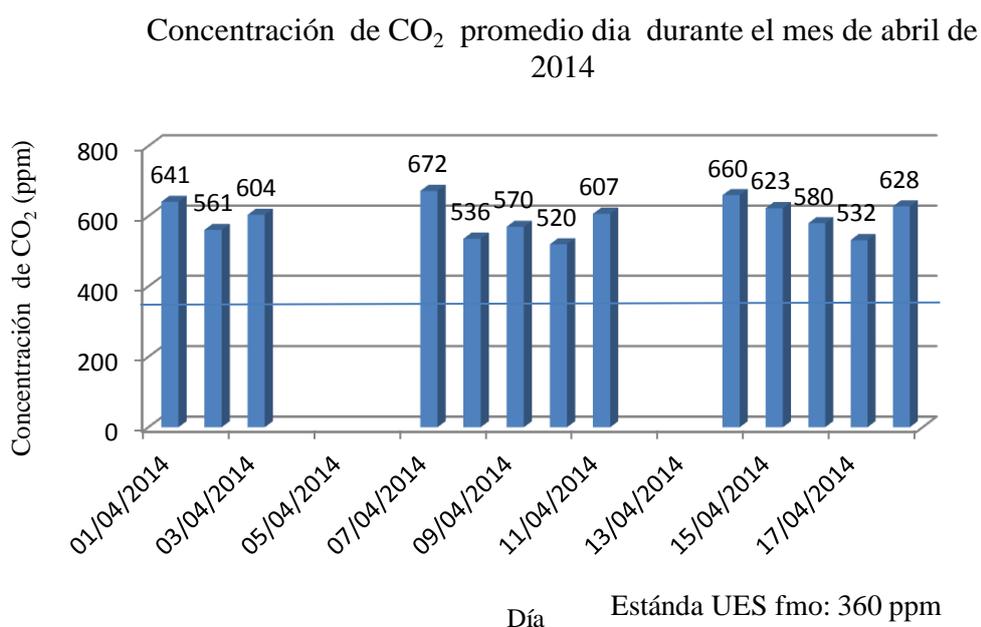


Figura 5.2. Medida de la concentración promedio diaria de CO₂ durante el mes de abril de 2014 en el sector norte del mercado central de San Miguel.

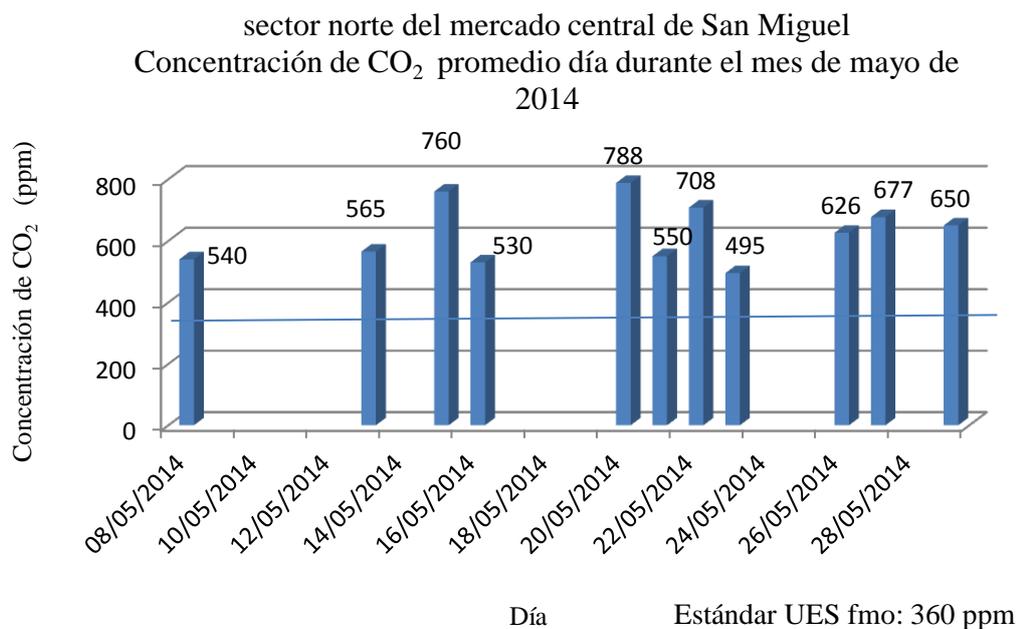


Figura 5.3. Medida de la concentración promedio diaria de CO₂ durante el mes de abril de 2014 en el sector norte del mercado central de San Miguel.

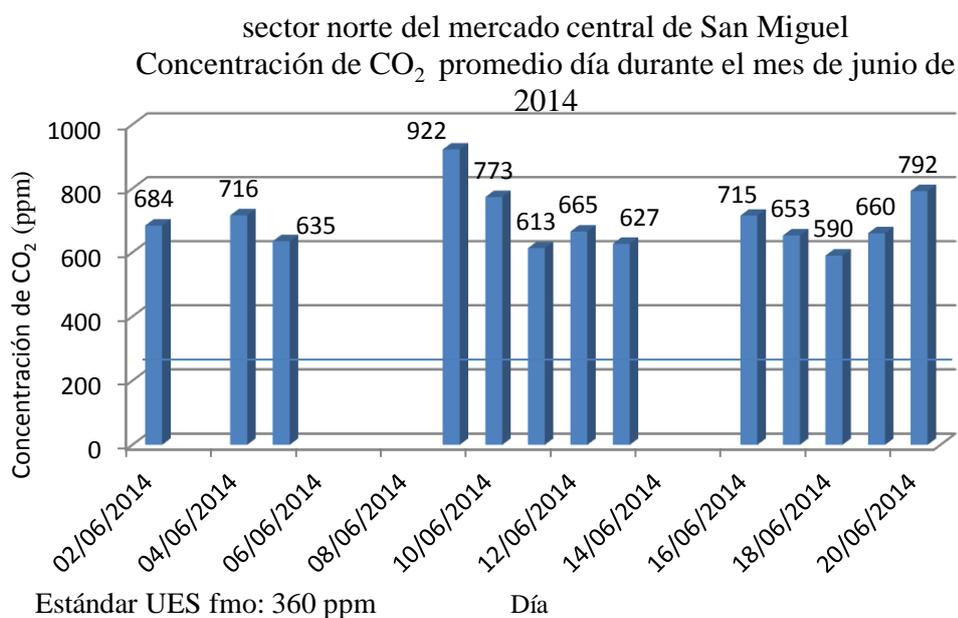


Figura 5.4. Medida de la concentración promedio diaria de CO₂ durante el mes de abril de 2014 en el sector norte del mercado central de San Miguel.

5.2 CONCENTRACIÓN PROMEDIO MENSUAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN EL SECTOR NORTE DEL MERCADO CENTRAL DE SAN MIGUEL.

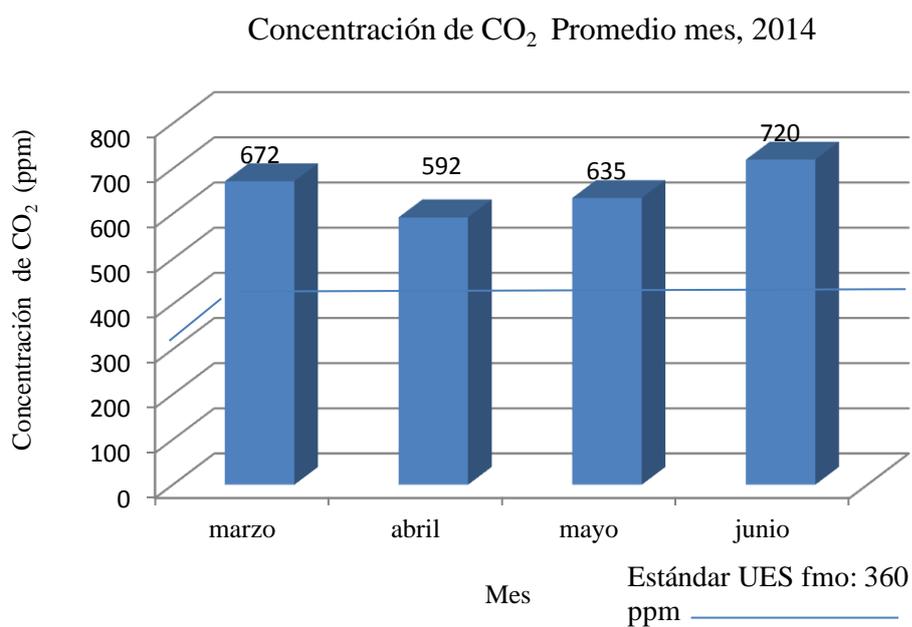


Figura 5.5. Medida de la concentración promedio mensual de CO₂ atmosférico en el sector norte del mercado central de San Miguel.

5.3 CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE DIÓXIDO DE CARBONO POR PUNTO DE MUESTREO

Concentración promedio de CO₂ vs Punto de muestreo sobre 2^a calle Poniente, sector norte del mercado central de San Miguel

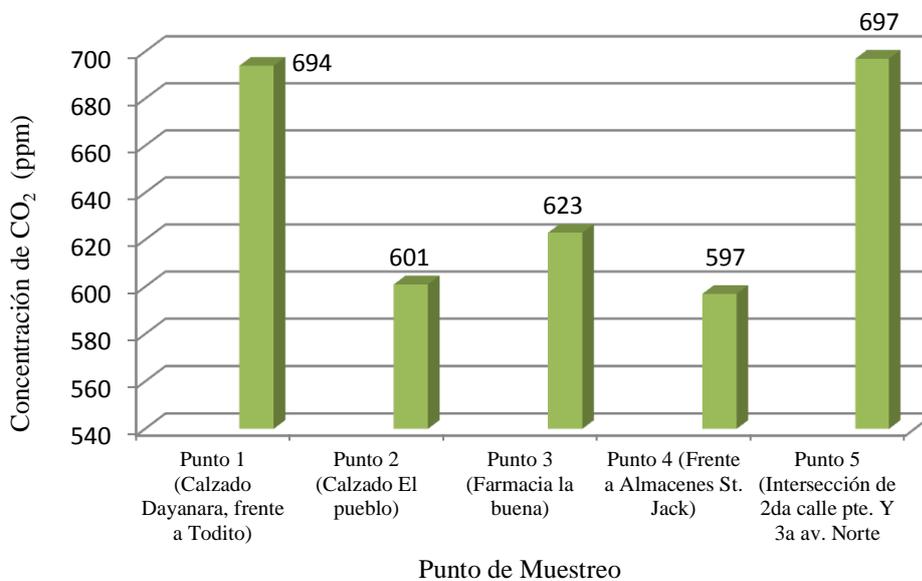


Figura 5.6. Medida de la concentración de CO₂ atmosférico promedio por punto de muestreo sobre la 2^a calle poniente.

Concentración promedio de CO₂ vs Punto de muestreo sobre la 4a calle Poniente entre 1a y 3a Avenida norte

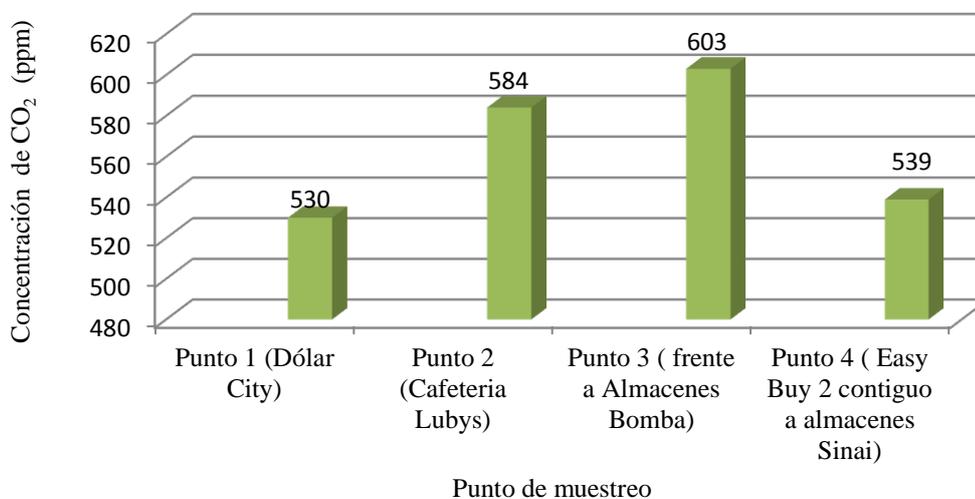


Figura 5.7. Medida de la concentración de CO₂ atmosférico promedio por punto de muestreo sobre la 4^a calle Poniente

Concentración promedio de CO₂ vs punto de muestreo sobre la 2^a y 4^a calle poniente (sector norte del mercado central de San Miguel)

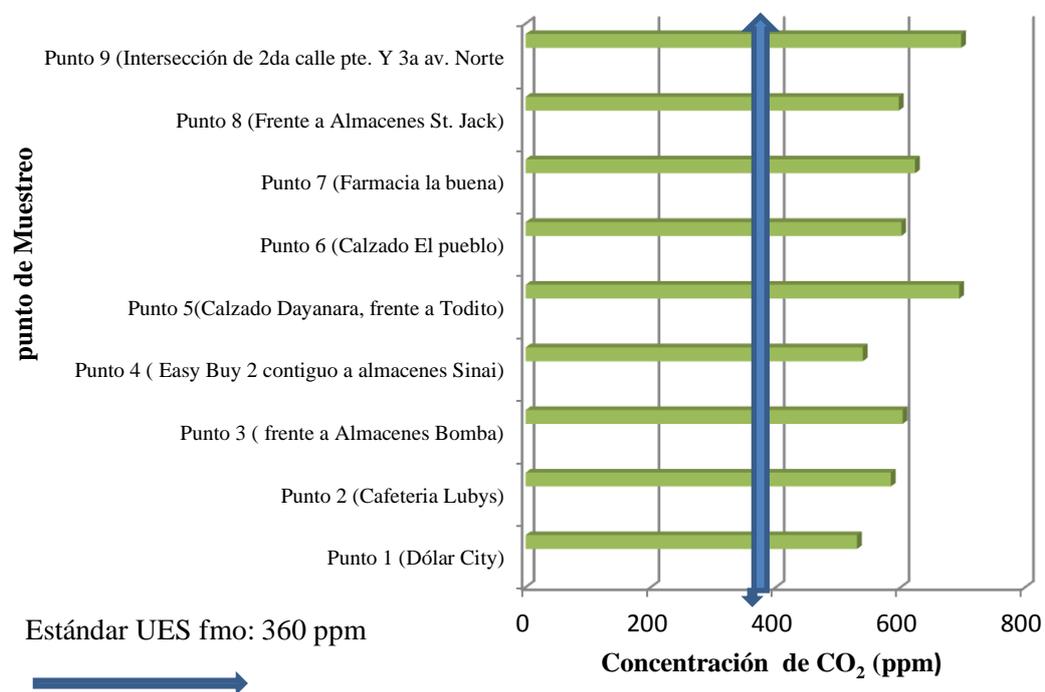


Figura 5.8. Resumen de la concentración de CO₂ atmosférico promedio en el sector norte del mercado central de San Miguel. La línea azul indica el valor (360 ppm) de CO₂, medido en un ambiente con ausencia de fuentes móviles.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base a los objetivos planteados en el capítulo 1 se efectúa la interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación.

La investigación consistió en medir la concentración de dióxido de carbono que es emitido por fuentes móviles que circulan sobre la 2^a y 4^a calle poniente del sector

norte del mercado central de San Miguel, para ello se tomaron alrededor de 928 muestras durante cuatro meses.

El valor mínimo de la concentración de CO₂ medido fue de 380 ppm y el valor máximo fue de 2000 ppm, debido a que el instrumento de medición está calibrado solamente para medir valores de concentración en el rango de 0 a 2000 ppm y esta es una de las limitaciones que se tuvieron durante la investigación. Tanto el valor mínimo como el máximo registrado sobrepasan el valor medido en un ambiente libre de fuentes móviles el cual fue de 360 ppm.

Las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 muestran los valores promedio de la concentración de CO₂ diaria medida durante los meses de marzo, abril, mayo y junio. Al analizar la tendencia de cada gráfico, se puede observar que abril es el mes que presenta los valores más bajos de concentración de dióxido de carbono, sin embargo todos estos valores están por encima del valor de la muestra blanco. Los valores medidos pueden haber sido afectados por la presencia de vientos observados ocasionalmente en la zona de estudio.

Junio es el mes que registra los valores promedios por día más altos de dióxido de carbono, alcanzando un máximo de 922 ppm, valor que claramente está por encima de la muestra blanco.

En la figura 5.4 se presentan los valores promedios mensuales de dióxido de carbono, el valor del mes de junio es el más alto 720 ppm. Si esta investigación se

hubiera realizado durante un año completo se podría observar con mayor exactitud la tendencia que sigue la concentración de dióxido de carbono en la zona de estudio.

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran los valores promedio de CO₂ respecto a los puntos de muestreo. En la figura 5.6 los valores indicados para los puntos 1 y 5 resultan ser mayores debido a la presencia de semáforos que ocasionan la acumulación de fuentes móviles y por ende el aumento de la concentración de dióxido de carbono. Los puntos con mayores niveles de concentración de CO₂ se ubican frente a PAR 2, Almacén Todito, Almacenes Bomba, Cafetería Lubys, y farmacia la Buena.

La figura 5.7 muestra una menor concentración en los puntos de muestreo localizados en la 4ª calle en comparación con los puntos de la 2ª calle poniente, esto se puede atribuir a que en los primeros se observa una mayor lentitud del tráfico vehicular ocasionado por la gran cantidad de comerciantes que se ubican sobre la calle, puntos de taxis no autorizados, microbuses y buses del transporte colectivo que efectúan constantes paradas no autorizadas sobre este sector.

Debido a que El espectrómetro utilizado tiene una precisión del 3% los resultados de esta investigación demuestran que la hipótesis planteada se cumple.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se puede concluir lo siguiente:

- La alta emisión de gases por fuentes móviles ocasiona una alta concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la zona de estudio.
- Los niveles más altos de concentración de CO_2 se emiten en la 2ª calle poniente, esta situación está relacionada con el lento tráfico vehicular generado por la mala distribución de espacios sobre dicho sector.
- Todos los valores de concentración medidos en la zona de estudio sobrepasan el valor medido en el campus de la Facultad Multidisciplinaria Oriental. Los valores de concentración medidos son entre un 50 y 200% mayores que el valor de referencia (UES).

6.2 RECOMENDACIONES

Después de haber realizado el trabajo de cuantificar el dióxido de carbono que es producido por las diversas fuentes móviles que circulan sobre el sector norte del mercado central de San Miguel se ha logrado observar que en la zona de estudio principalmente en la 2ª calle poniente se emiten altas cantidades de dióxido de carbono y una variedad de gases nocivos que contribuyen a la contaminación atmosférica, por lo que se recomienda;

- ✓ Desarrollar estudios futuros ya sea utilizando el método de la cámara de acumulación u otro tipo de método que se estime conveniente para la cuantificación de dióxido de carbono con la finalidad de comprobar o verificar los resultados obtenidos en este trabajo de forma teórica y práctica, así como también se estará contribuyendo a la generación de información sobre contaminación atmosférica en la ciudad de San Miguel.

- ✓ Extender un estudio similar al actual a otros sectores con alta concentración de fuentes móviles y por más tiempo con la finalidad de obtener un información suficiente que permita efectuar un análisis más completo sobre el estado de la contaminación del aire en la ciudad de San Miguel debido a la emisión de Dióxido de Carbono.

- ✓ Se recomienda también efectuar estudios similares pero midiendo otro tipo de gases efecto invernadero por ejemplo Óxidos Nitroso (NO_x) y Dióxido de Azufre (SO_2) que son componentes potenciales del efecto invernadero de origen antropogenico.

- ✓ se recomienda la actualización de la normativa que actualmente tiene el país para regular las emisiones por fuentes móviles y que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales vele por el fiel cumplimiento de estas leyes.

- ✓ Al gobierno que realice más estudios sobre cuantificación de gases efecto invernadero especialmente de CO_2 en el país.

Referencias Bibliográficas

- 1- ANTONIO SANTAMARÍA, Jesús. *Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera*. [Documento electrónico]. Madrid : Universidad Complutense, 2010. (citado: 2 feb. 2015) < (<http://www.rac.es/ficheros/doc/00914.pdf>)>.
- 2- ATAZ, Ernesto Martínez y DIAZ DE MERA MORALES, Yolanda. *Contaminación Atmosférica*. 3a. ed. Sevilla : Universidad de Sevilla, Editorial La Mancha, 2004. 288 p.
- 3- Banco Mundial. Postman Institute For Climate Impact Research and Climate Analytics 2015 grupo del banco mundial (citada: 22 de marzo de 2015). “*Turn down the heat of century*”. [Documento electrónico].
<(<http://www.bancomundial.org/es/news-report-examines-risks-of-degree-hotter-world-by-end-turndowntheheatof-century>)>.
- 4- BECK, George E. *180 Years of Atmospheric CO₂ Gas Analysis by Chemical Methods*. [Documento electrónico]. United Kingdom : Energy & Environment. VOLUME 18 No. 2 2007. (Citada: 12 mar. 2015). [Documento electrónico].
http://www.biomind.de/nogreenhouse/daten/EE%2018-2_Beck.pdf
- 5- Boletín de La Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre los gases de efecto invernadero. Reporte N° 10 *Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2013*. Publicado

- el 9 de septiembre de 2014. ISSN 2078-0818. [Documento Electrónico].
<http://www.wmo.int/pages/documents/ghg-bulletin_10_es.pdf>.
- 6- BOSCH, Robert. *Manual de la Técnica del Automóvil*. 4ª. ed. Alemania : STAR Group, 2005. p. 550-551.
- 7- Carbon dioxide flux meter Handbook. First released edition: 5.01 Pisa, Italy, October 31, 2003. [Documento electrónico].
<http://www.westsystems.com/documentation/HandBook%205_01_28_November2003.pdf>.
- 8- Carbon dioxide at NOAA'S Mauna Loa Observatory reaches new milestone: tops 400 ppm . consultado el 5 de mayo de 2014. [Documento electrónico]. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Mauna Loa
<<http://www.w.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>.
- 9- CASTELLAN, Gilbert W. “Fisicoquímica”. 2a. ed. México : Addison Wesley, 1998. P. 659-666.
- 10- CAVASASSI, José Luis. “*Sensor Infrarrojo de CO₂, no Dispersivo de Doble Canal*” Bolivia 1340 (C1416ANF) Capital Federal jlcala@arnet.com.ar
www.cavadevices.com. En Línea. Internet 8 de agosto de 2015. Disponible <

<http://www.cavadevices.com/archivos/FOLLETOS/SENSOR%20NDIR%20CO2.pdf> >

11-Diario oficial. San Salvador, 26 de agosto de 2003. [Documento Electrónico].
<<http://www.diariooficial.gob.sv/diarios/do-2003/08-agosto/26-08-2003.pdf>>.

12-CABALLERO, Margarita, LOZANO, Socorro, y ORTEGA, Beatriz. *Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: una Perspectiva desde las Ciencias de la Tierra*. Instituto de Geofísica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 8, No. 10 (10 OCT. 2007). México: Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM, 2007. 11p. ISSN: 1067-6079. [Documento electrónico: Revista Digital Universitaria].<
<http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm> >

13-FIRGUERELO ALEJANO, Juan E. y MARINO DAVILA, Martin. *Química Física del Ambiente y de los Procesos Productivos*. 4a. ed. Barcelona : Editorial Reverte, 2004. p. 7-13, 33.37, 355-398

14- GARDUÑO, Rene. *El Veleidoso Clima*. México : la ciencia para todos, 1998. # 127. FCE-SEP-CONACYT

15- GORRINI, Federico Alberto. *Historia Sobre la Teoría del Calentamiento Global*. En línea. Internet 8 abril 2015.Disponible.

<http://www.monografias.com/trabajos52/cambio-climatico/cambio-climatico2.shtml>.

16- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 2001 Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Ginebra, Suiza : IPCC, 13-17 feb. 2001 93 p. [Documento Electrónico]. <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>.

17- HARDY, R., WRIGHT, P., GRIBBIN, J., y KINGTON, J. *El Libro del Clima*. Vol. III. Barcelona : Ediciones Orbis, S.A. 1986

18- Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. “*Cambio Climático 2007 : Informe de Síntesis*”. [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra, Suiza : IPCC, 2007 104 p. [Documento Electrónico].
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf.

19- Instituto Nacional de Ecología. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Cambio Climático : una visión desde México*. 1ª. ed. Noviembre de 2004. Hecho e impreso en México. [Documento Electrónico].
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/437.pdf>

- 20- LI-820 CO₂ Analyzer instruction manual. Nebraska, USA. Copyright 2002, LICOR, Inc. Publication Number 984-06557. [Documento electrónico].
<<http://www.eol.ucar.edu/homes/stephens/RACCOON/AIRCOADIST/AUXPDFs/LI820Manual.pdf>>.
- 21- Meganeboy, Dani. (2014). *Aficionados por la Mecánica*. [En Línea].
Disponible en <<http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.html>>
- 22- Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente. *Primera Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático, El Salvador 2000*. [Documento electrónico].
<<http://www.marn.sv/component/phocadownload/category/12-cambio-climatico.html?download=21:primera-comunicacion-nacional-sobre-cambio-climatico-de-el-salvador-ano-2000>>
- 23- Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente. *Informe narrativo de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático: inventario nacional de gases de efecto invernadero, El Salvador, 2005*. [Documento electrónico].
< <http://www.marn.sv/component/phocadownload/category/12-cambio-climatico.html?download=22:inventario-gases-de-efecto-invernadero-ano-2005-informe-narrativo>>

- 24- Ministerio de industria, turismo y comercio. *Procedimiento QU-007 Para la Calibración de Analizadores de Dióxido de Carbono (CO₂) técnica (NDIR)*. Edición digital 1. Madrid : Centro Español de Metrología, 2006. disponible <http://www.cem.es/sites/default/files/qu-007_digital.pdf>
- 25- OLMOS, GUEVARA, Rodolfo A. *distribución espacial de Flujo de Dióxido de Carbono (CO₂) y Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) en el volcán San Miguel*. San Salvador, 2012, 62 p. trabajo de tesina (Especialista en Evaluación de Peligrosidades Naturales). Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- 26- Portable flux meter handbook Release 8.1. Italia January 2012. [Documento electrónico]. <[http://www.westsystems.com/doc/Handbook Portable 8.1.pdf](http://www.westsystems.com/doc/Handbook_Portable_8.1.pdf)>.
- 27- Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental; decreto ejecutivo No. 40; De la República de El Salvador; diario oficial No. 73; tomo No. 397; El Salvador, 12 de abril 2000.
- 28- SAMPIERI, HERNÁNDEZ, Roberto, COLLADO, FERNÁNDEZ, Carlos y LUCIO, BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la Investigación*. 4^a ed. México : McGraw-Hill/ Interamericana SA. DE CV., 2006

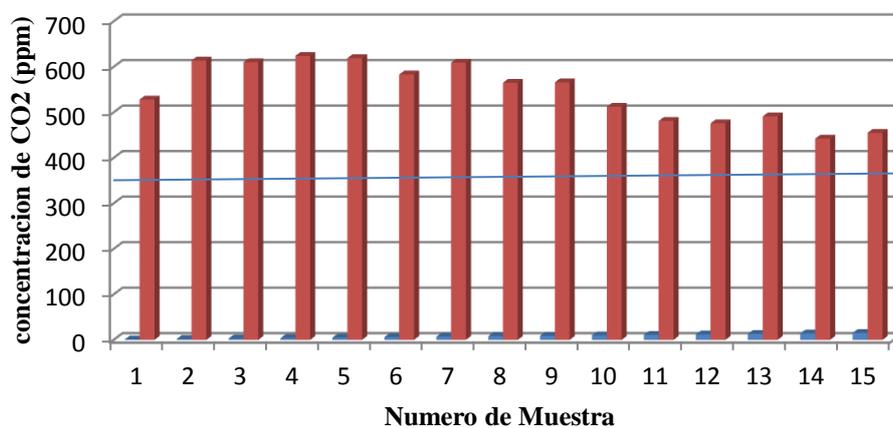
- 29- SARMIENTO, Jorge L. y GRUBER, Nicolás. *Sink for Antropogenic Carbon*. Physics Today. 22 de agosto de 2002. p. 30-36. [Documento Electrónico]. <<http://www.physicstoday.org>>.
- 30- SCHMELKES, Corina. *Manual para la Presentación de Anteproyectos e Informes de Investigación (Tesis)*. Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica. México : HARLA S.A. de C.V. 1988.
- 31- TARBUCK, Edward J. y LUTGNES Frederick k. *Ciencias de la Tierra*. 6a ed. Madrid : Prentice hall, 1999. p. 489-492.
- 32- *Tercer informe Nacional del Estado del Medio Ambiente*. (2003-2006) ; Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador, Centroamérica.
- 33- TOHARIA, M. *Tiempo y Clima*. Colección temas clave, Madrid : Salvat Editores, 1984.
- 34- VOITURIEZ, B. *La Atmósfera y el clima*. Barcelona : Colección Conocer la Ciencia. RBA Editores, 1994.

ANEXOS

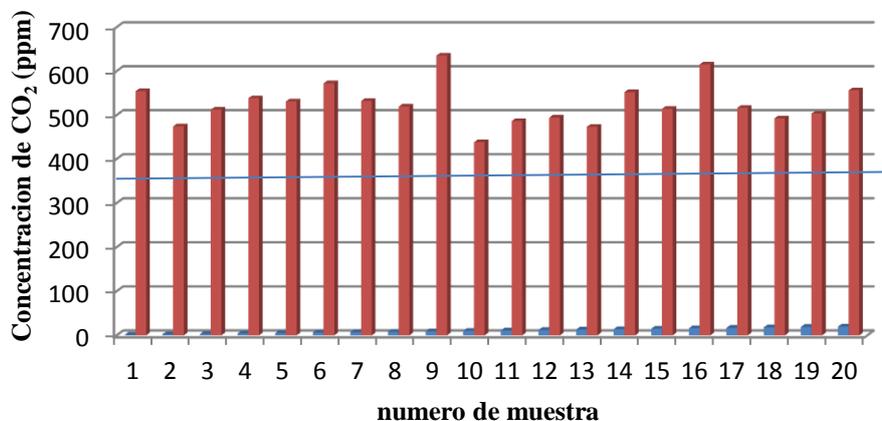
ANEXO 1

Graficas diarias de la Concentración de Dióxido de Carbono por punto de muestreo

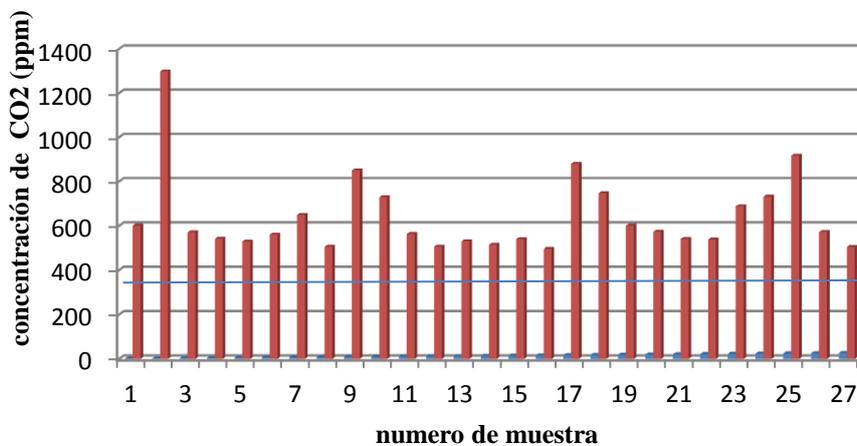
concentración de CO₂ vs número de muestra (19 de marzo de 2013, frente a dolar city, ciudad de San Miguel, centro)



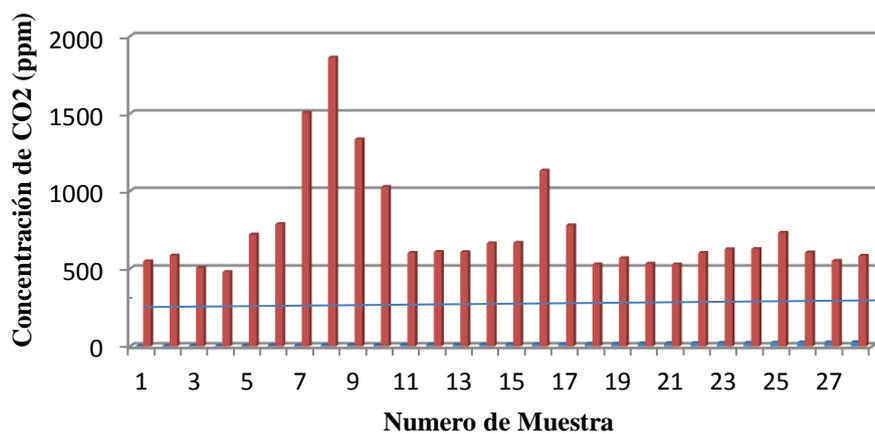
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (21 de marzo de 2014, calle sinai, frente a dolar city)



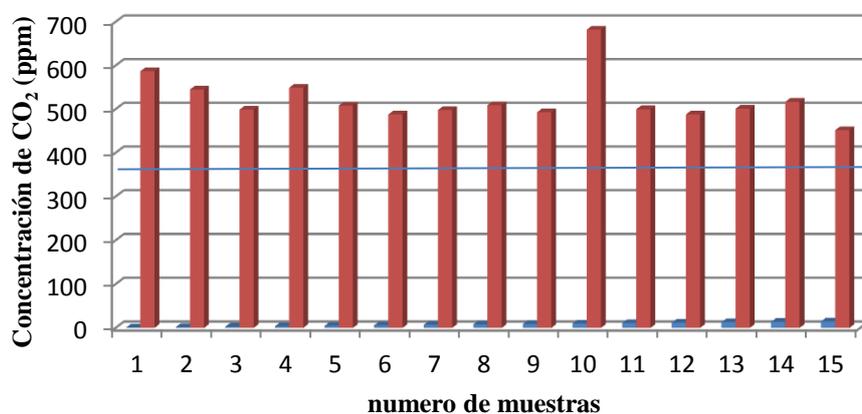
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (20 de marzo de 2014, calle sinai, frente a calzado dayanara)



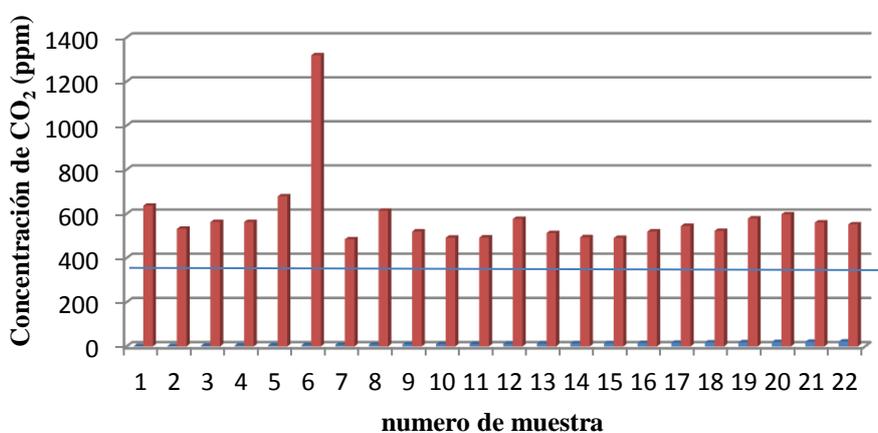
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (24 de marzo de 2014, 2da calle poniente)



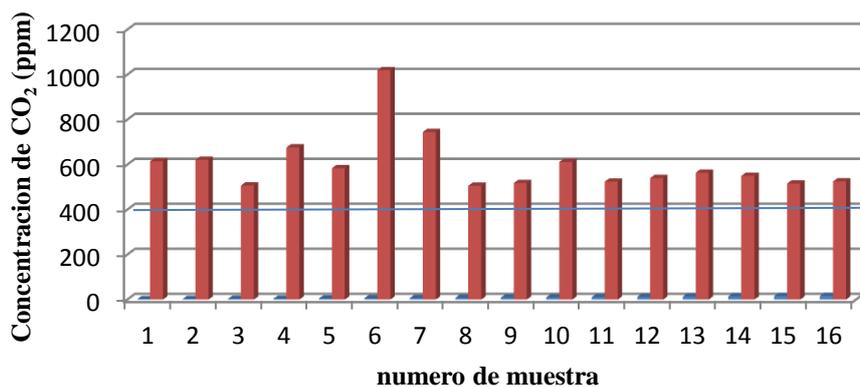
Concentración de CO₂ vr número de muestra (25 de marzo, calle sinai frente a city dollar)



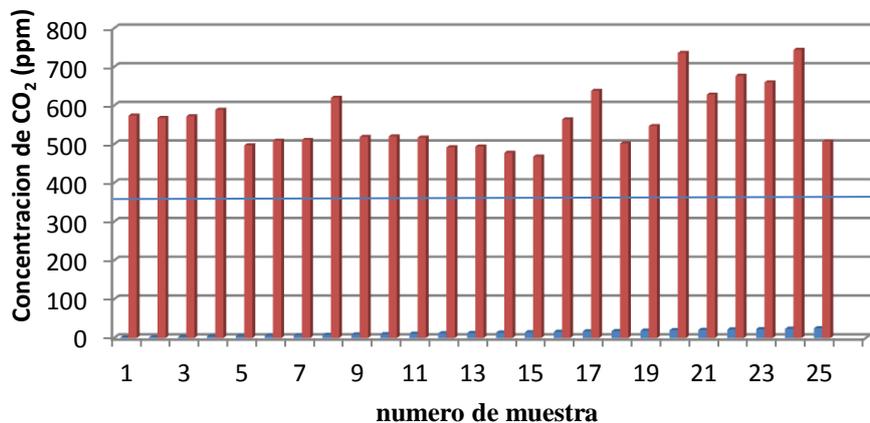
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (27 de marzo de 2014, calle sinai, frente a cafeteria lubys)



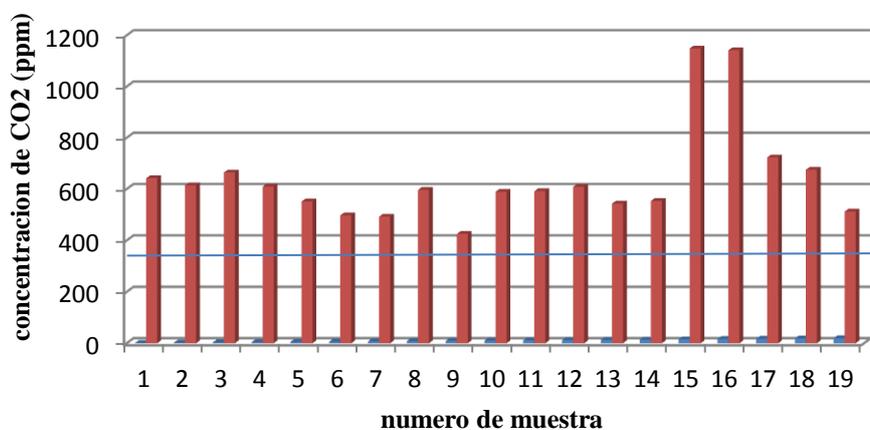
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (28 de marzo de 2014, calle Todito, frente a calzado El Pueblo)



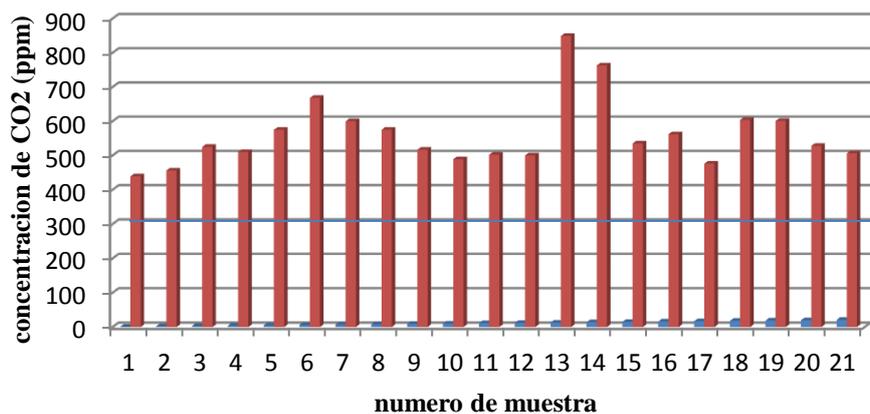
Concentración de CO₂ vrs número de muestra, 31 de marzo de 2014, calle sinai (frente a almacenes Bomba)



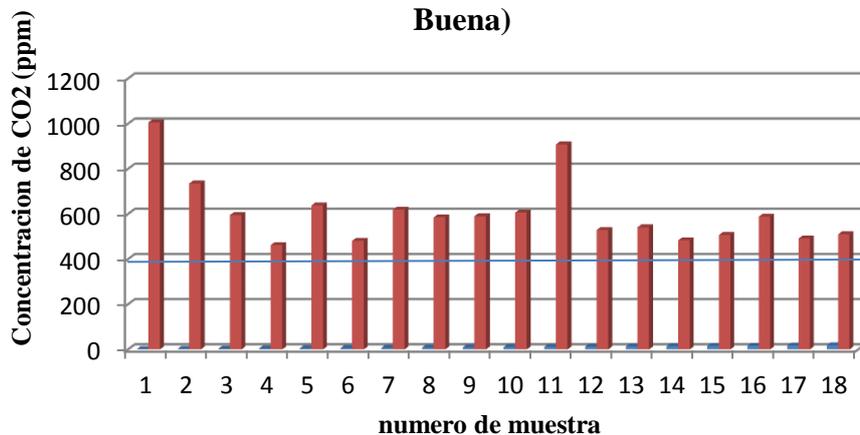
Concentración de CO₂ vrs número de muestra, calle Todito (1 de abril de 2014, frente a farmacia la buena)



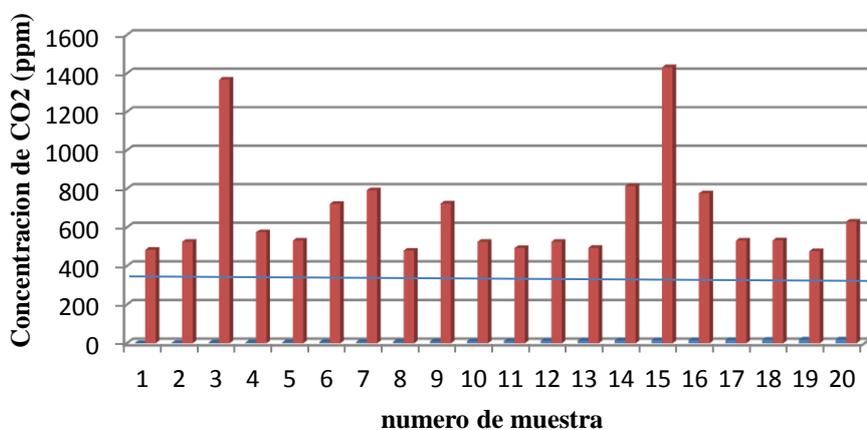
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (2 de abril de 2014, calle sinai, frente a easy buy)



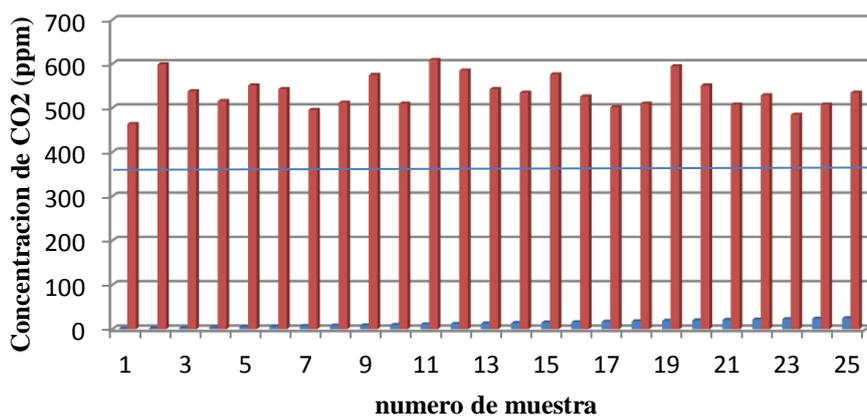
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (3 de abril de 2014, calle todito, frente a Farmacia La Buena)



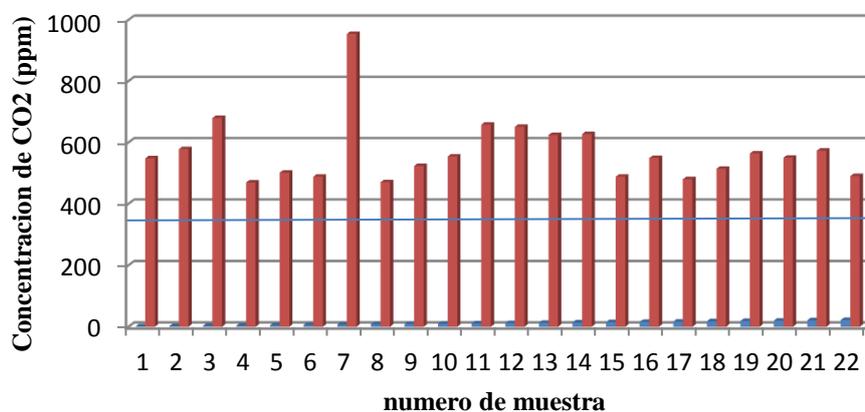
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (7 de abril de 2014, calle todito, frente a almacenes St Jack)



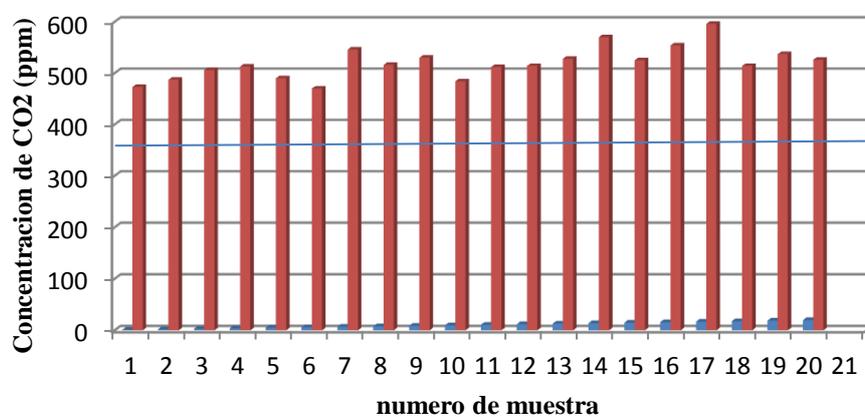
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (8 de abril de 2014, calle sinai, frente a easy buy)



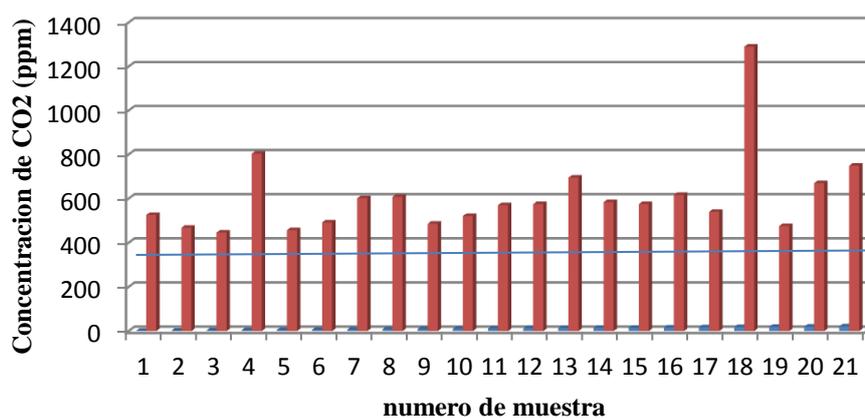
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (09 de abril de 2014, calle sinai, frente a almacenes st Jack)



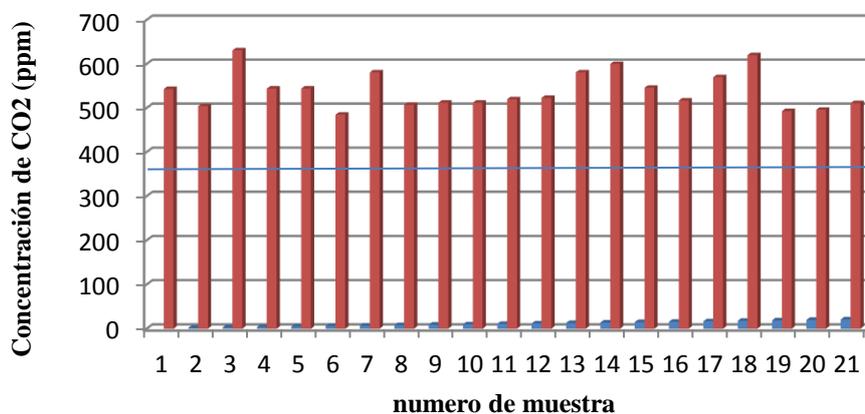
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (10 de abril de 2014, calle sinai, frente easy buy)



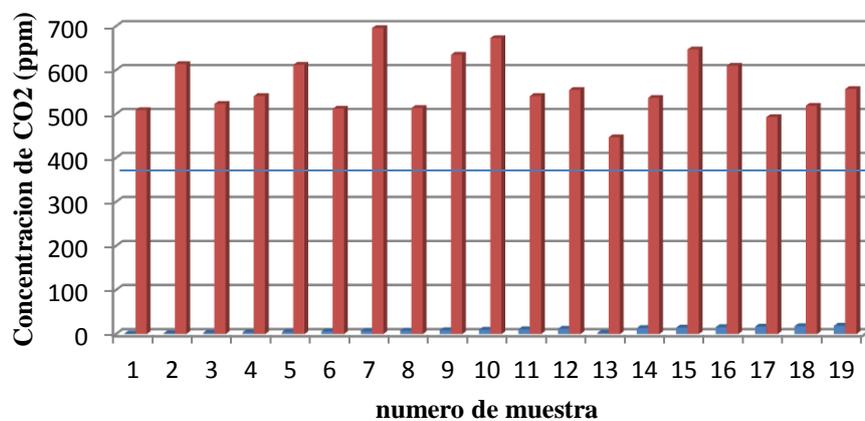
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (11 de abril de 2014, TODITO, frente a st Jack)



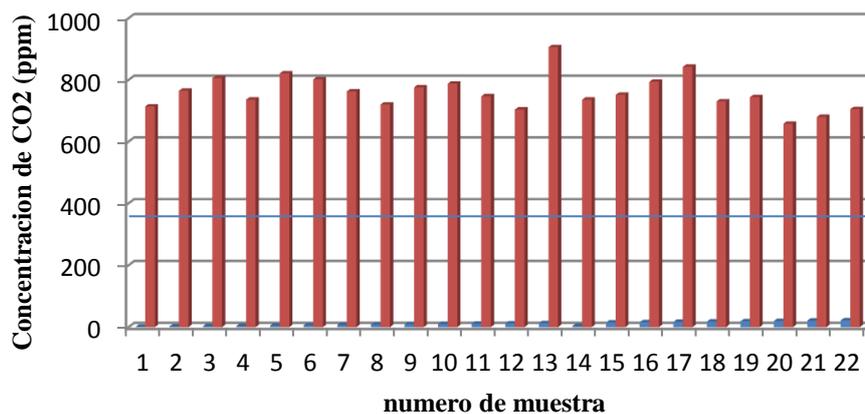
concentración de CO2 vrs número de muestra (8 de mayo de 2014, calle sinai)



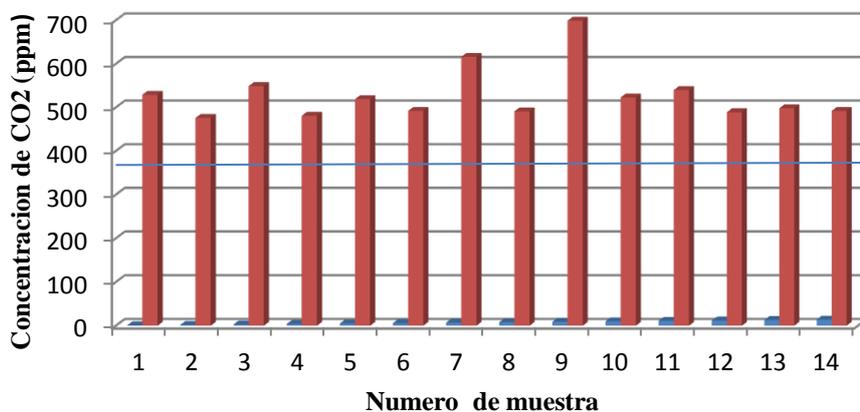
Concentración de CO2 vrs número de muestra (calle todito, frente a st Jack. 13 de mayo de 2014)



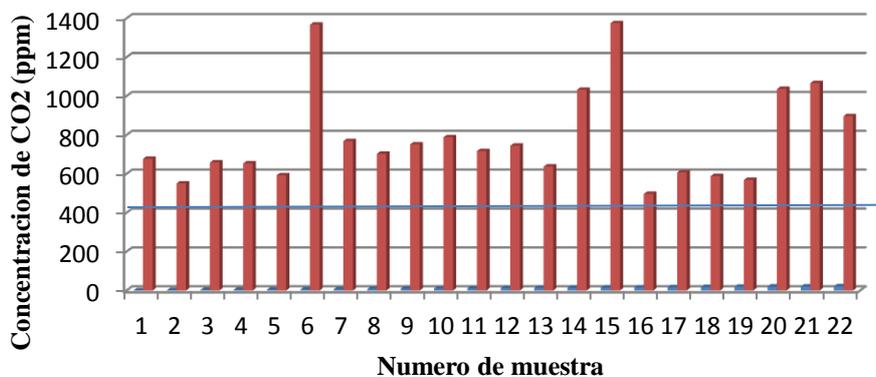
Concentración de CO2 vrs número de muestra (15 de mayo de 2014, frente a almacenes bomba, calle Sinai)



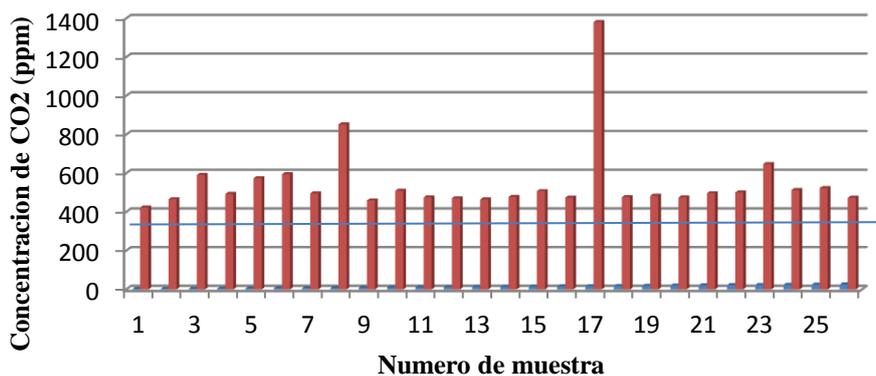
Concentración de CO₂ vrs número de muestra (16 de mayo de 2014, calle todito frente a St. Jack)



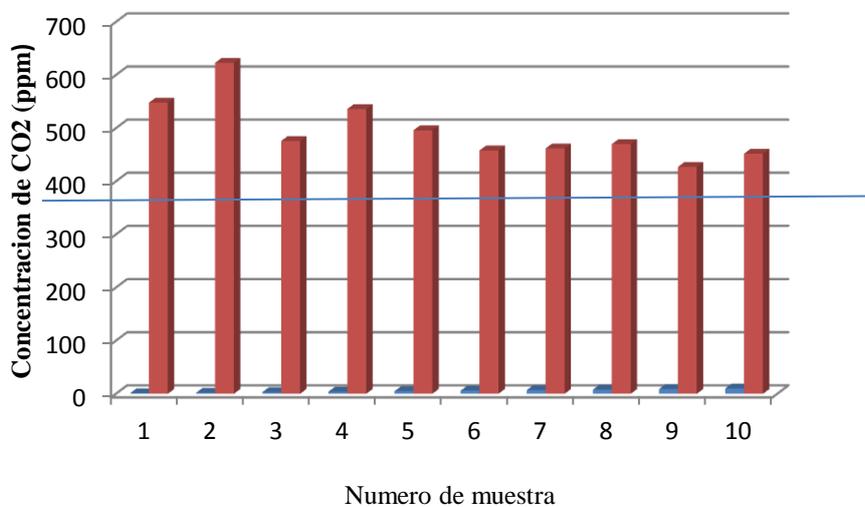
Concentración de dióxido de carbono vrs número de muestra (20 de mayo de 2014, calle todito, frente a par 2)



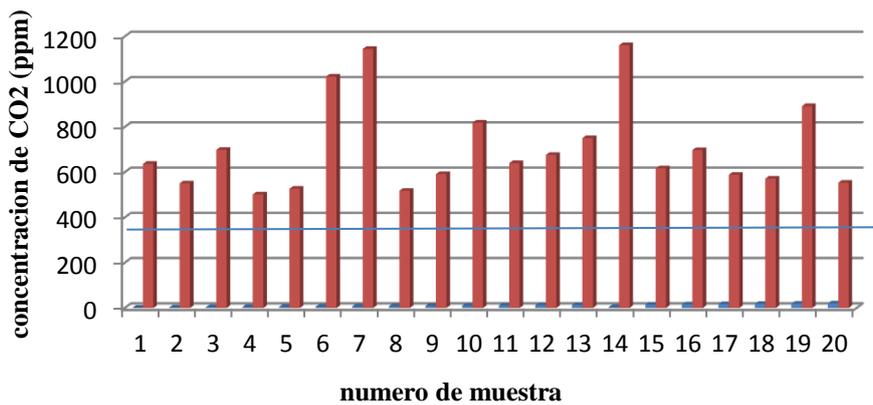
Concentración de dióxido de carbono vrs número de muestra (21 de mayo de 2014, calle sinai, frente a almacenes Bomba)

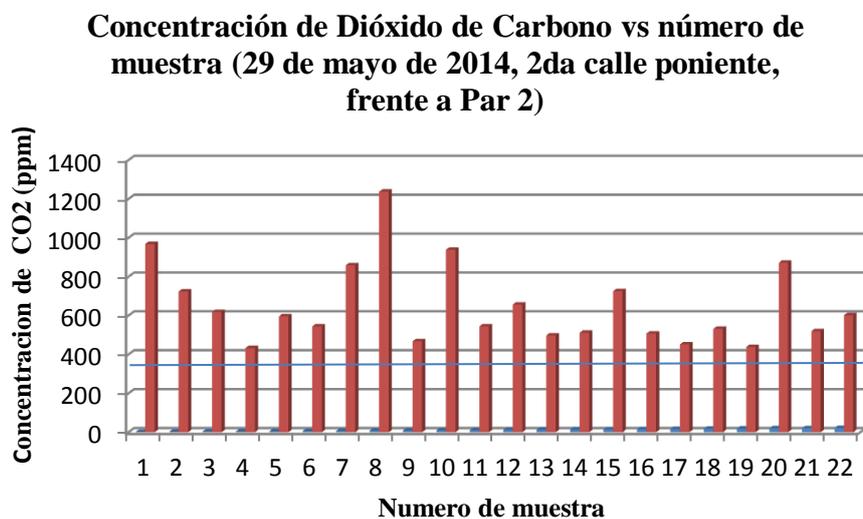
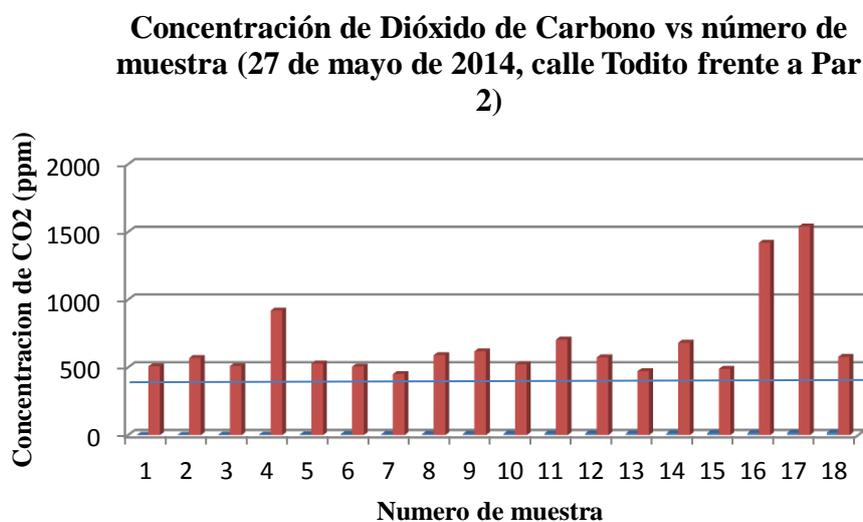
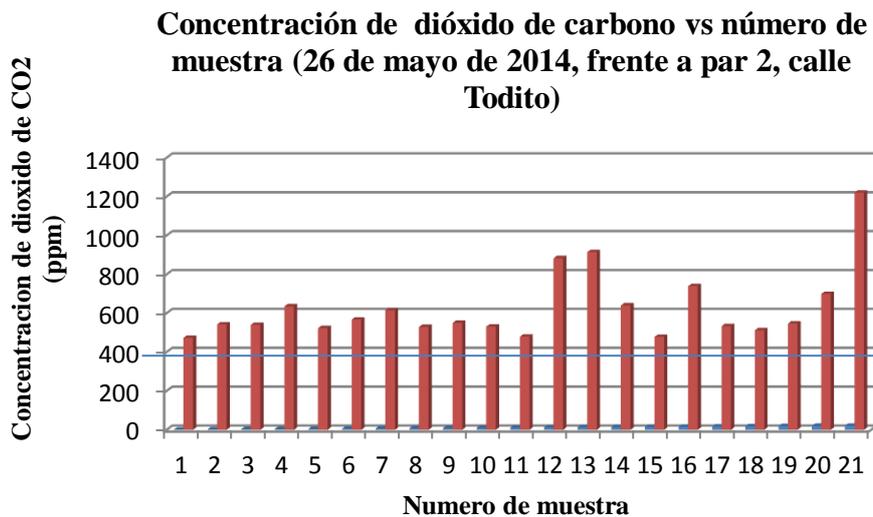


Concentración de dióxido de carbono vs número de muestra (23 de mayo de 2014, frente a almacense Bomba, calle sinai)

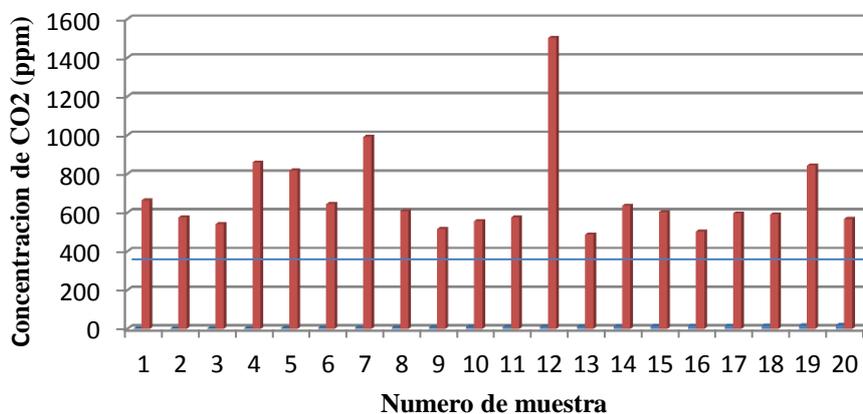


Concentración de dióxido de carbono vs número de muestra (22 de mayo de 2014, calle Todito, frente a par 2)

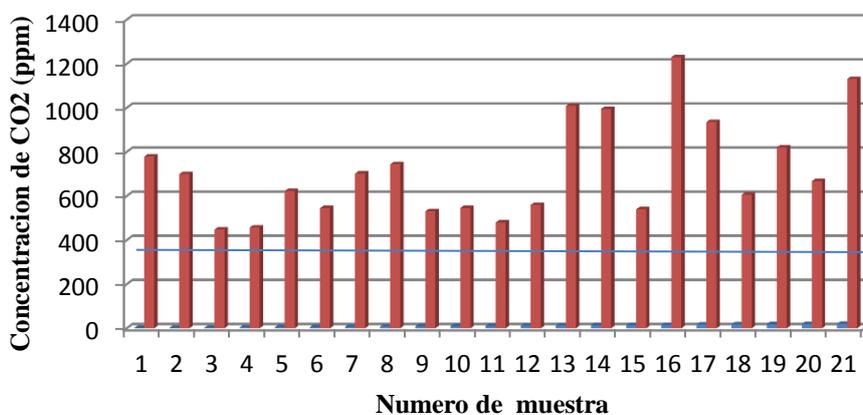




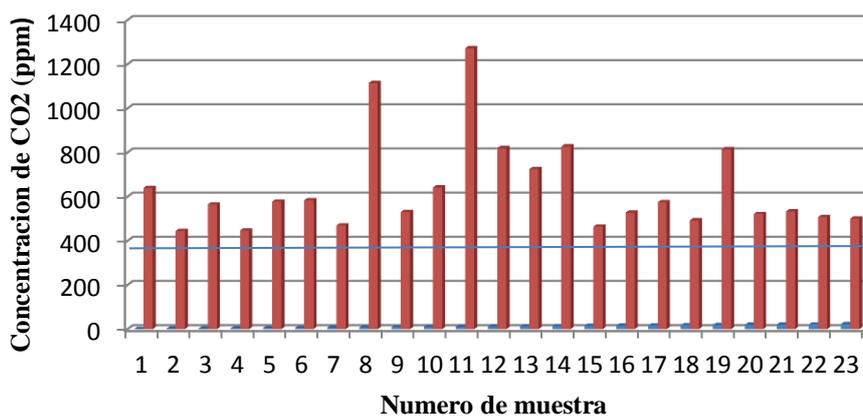
Concentración de CO₂ vs número de muestra (2 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



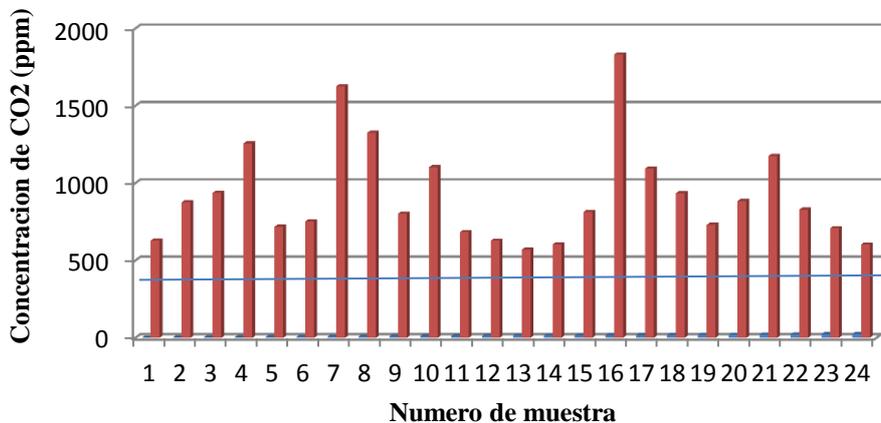
Concentración de CO₂ vs número de muestra (4 de junio de 2014, 2da calle poniente frente a par 2)



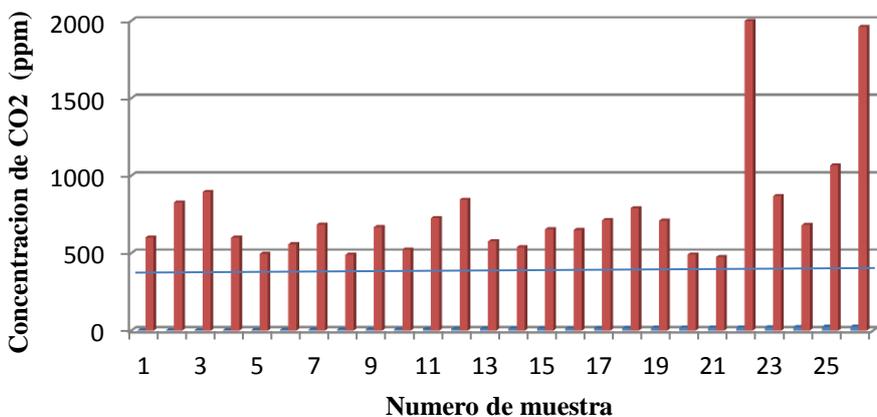
Concentración de CO₂ vs número de muestra (5 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



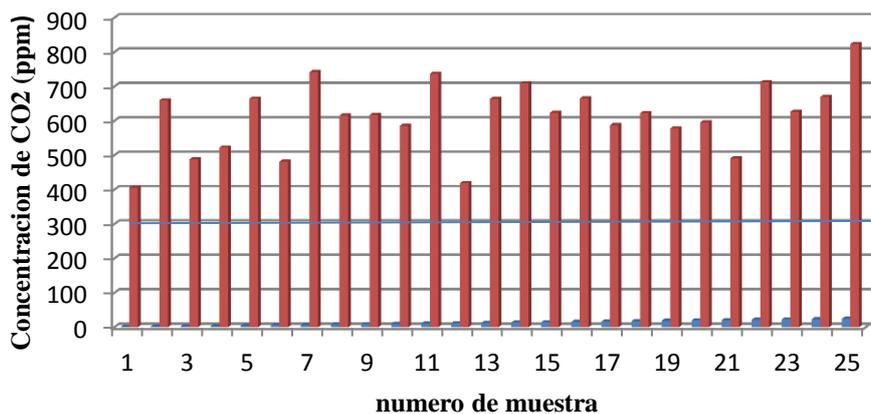
Concentración de CO2 vs número de muestra (9 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



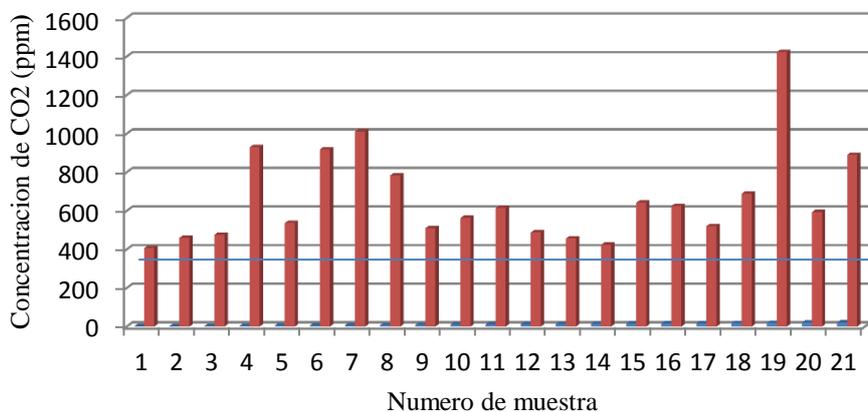
Concentración de CO2 vs número de muestra (10 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



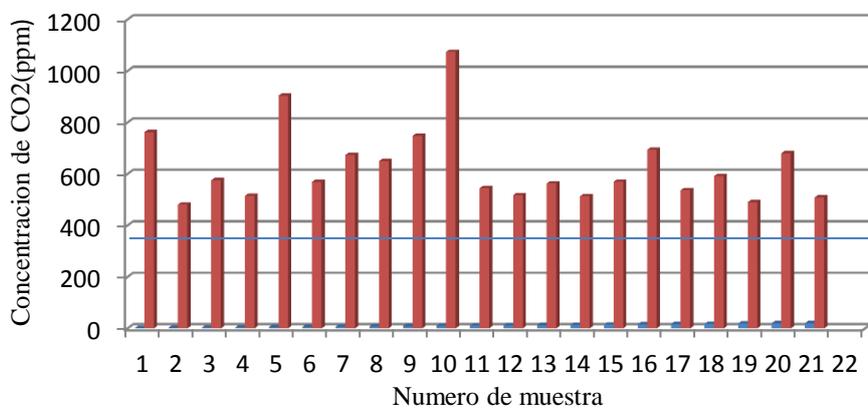
Concentración de CO2 vs número de muestra (11 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



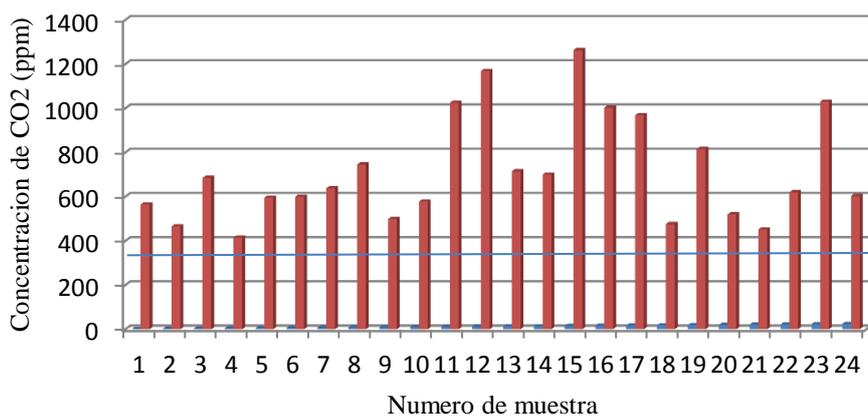
Concentración de CO2 vs número de muestra (12 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



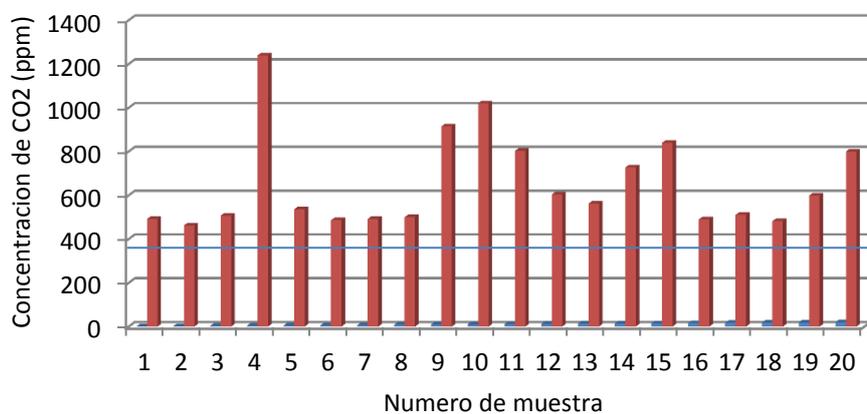
Concentración de CO2 vs número de muestra (13 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



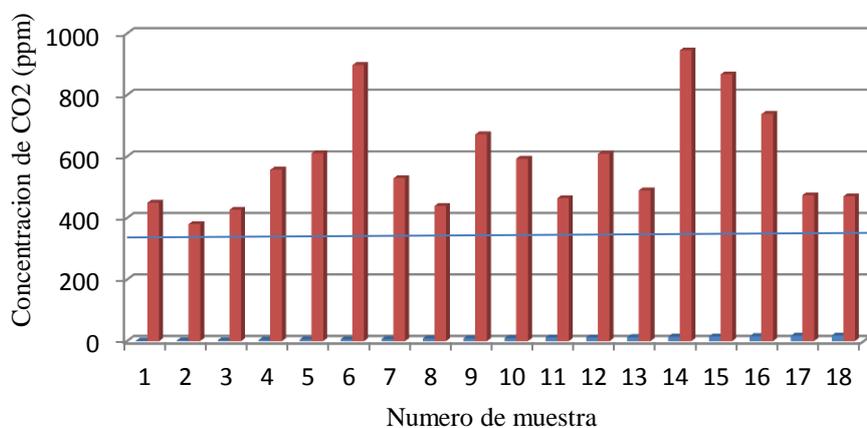
Concentración de CO2 vs número de muestra (16 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



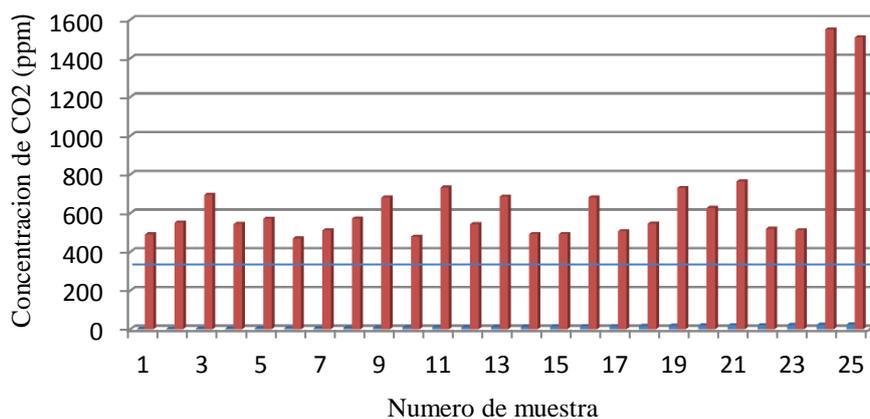
Concentración de CO₂ vs número de muestra (17 de junio, 2da calle poniente, frente a par 2)



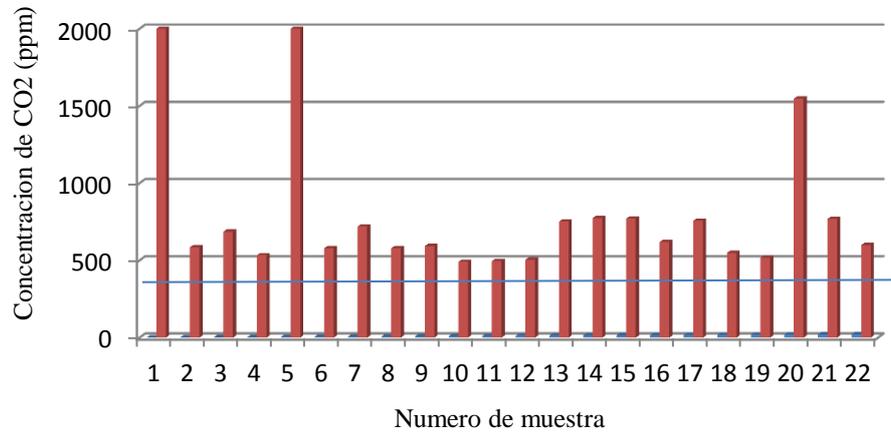
Concentración de CO₂ vs número de muestra (18 de junio de 2014, 2da calle poniente frente a par 2)



Concentración de CO₂ vs número de muestra (19 de junio de 2014, 2da calle poniente, frente a par 2)



Concentración de CO₂ vs número de muestra (20 de junio de 2014, 2da calle poniente frente a par 2)



ANEXO 2

Espectrometro infrarrojo no dispersivo licor li-820

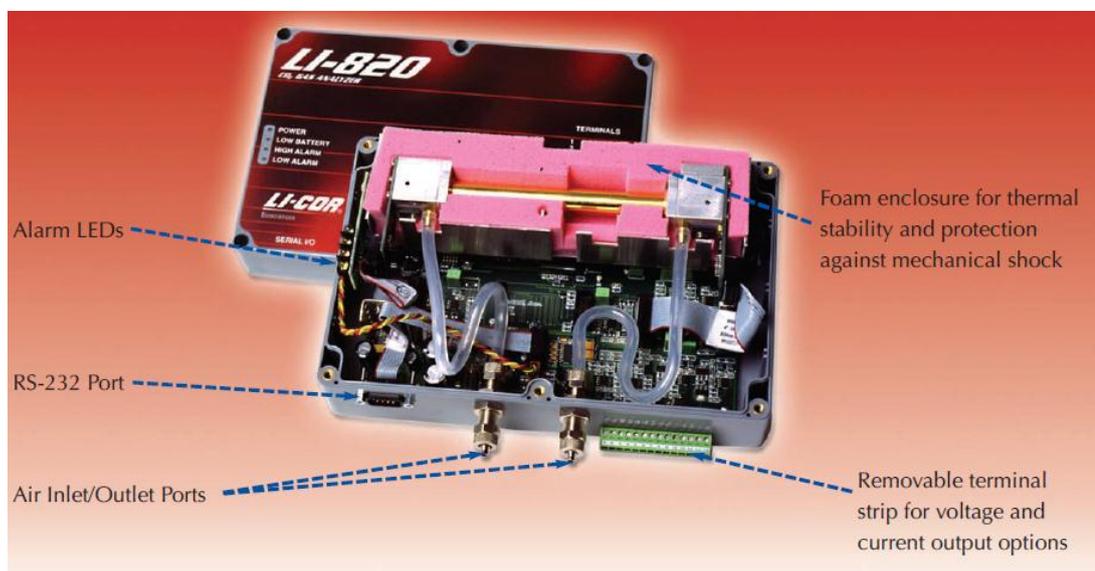


Espectrometro infrarrojo y cámara de acumulación



Anexo 3

Especificaciones técnicas del espectrometro infrarrojo licor LI-820



For Continuous CO₂ Monitoring Applications

The LI-820 is an absolute, non-dispersive, infrared (NDIR) gas analyzer based upon a single path, dual wavelength, infrared detection system. This low-cost, low-maintenance analyzer is designed for continuous monitoring of CO₂ over a wide range of environmental conditions.

LI-820 Features

- High accuracy over the entire measurement range due to automatic temperature and pressure compensation
- High stability with low zero and span drift
- 1 ppm signal noise at 370 ppm CO₂
- CO₂ measurement range of 0-20,000 ppm
- User cleanable optical path does not require factory recalibration
- Factory calibration made using gases traceable to WMO and EPA standards
- Operating temperature range of -25 °C to +45 °C

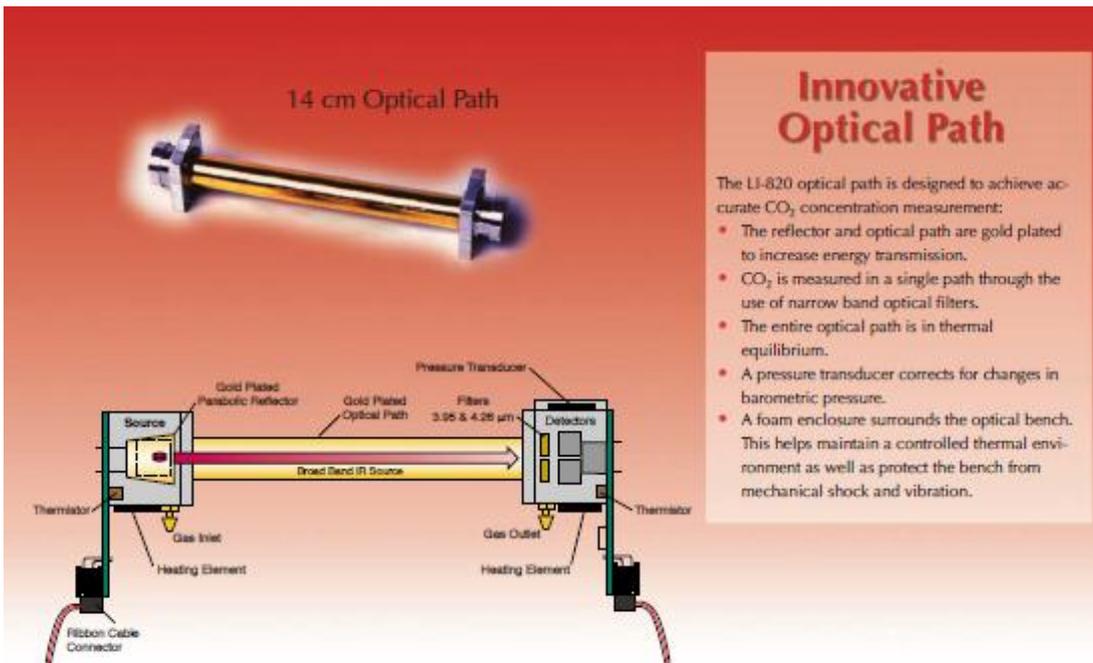
- Output data using serial port or analog signals

- Compact, lightweight design with low power consumption

User defined high and low alarms are available as voltage outputs, allowing you to control CO₂ within a desired range. For instance, the LI-820 can trigger an exhaust fan in a greenhouse environment. Relays can trigger devices such as automatic dialers, alarms, pumps, and valves in industrial environments. Alarm values can be changed easily using the Windows®-compatible application software included with the LI-820.

Multiple Data Outputs

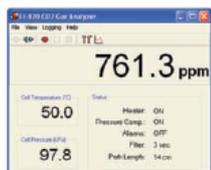
The LI-820 includes easy-to-use Windows® interface software for user calibration and data collection. You can easily set operational parameters and logging options, as well as output data to a printable chart. Once parameters have been set, a main window displays CO₂ concentration and status of settings.



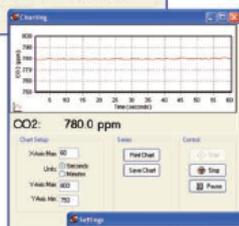
Innovative Optical Path

The LI-820 optical path is designed to achieve accurate CO₂ concentration measurement:

- The reflector and optical path are gold plated to increase energy transmission.
- CO₂ is measured in a single path through the use of narrow band optical filters.
- The entire optical path is in thermal equilibrium.
- A pressure transducer corrects for changes in barometric pressure.
- A foam enclosure surrounds the optical bench. This helps maintain a controlled thermal environment as well as protect the bench from mechanical shock and vibration.



The LI-820 communications software main window displays CO₂ concentration and status of settings.



Real-time strip charts can be printed or saved to a file.



Operational parameters are easily changed in the Settings window

A choice of analog outputs (Temperature, Pressure, or CO₂) are selectable on either of the two user-scalable DAC channels. Linear analog voltage (0-2.5V, 0-5V) and current loop (4-20mA) outputs are available. A removable terminal strip allows easy connection of external recording devices such as the LI-COR LI-1400 Datalogger.

An eXtensible Markup Language (XML) communication protocol provides for complete OEM application integration. XML is a simple text-based language allowing bi-directional communication between the LI-820 and your data acquisition system. As an example, sending this command:

```
<LI820><DATA>?</DATA></LI820>
```

instructs the LI-820 to send the most recent set of data values. The XML communication protocol allows the LI-820 to be polled for data at user-defined intervals, globally reconfigured, or configured to perform automatic calibration routines.

Applications

The LI-820 can be used for continuous monitoring of carbon dioxide under a wide range of environmental conditions due to its stability, accuracy, and design. As a result, the instrument can be used in a variety of applications:

- pCO₂, DIC
- Indoor Air Quality
- CO₂ Sequestration
- CO₂ Storage
- Soil CO₂ Flux
- Ambient Air Monitoring
- Meteorology
- Agriculture
- Horticulture
- Entomological Respiration Studies
- Volcanology
- Geological Monitoring
- Bioremediation
- TOC Analyzer System
- Particulate Analyzer System
- Greenhouse Control Systems
- Growth Chambers
- Fruit Storage
- Food and Beverage Industry
- Industrial CO₂ Monitoring
- Other Portable Instruments Requiring CO₂ Detection

Specifications*

CO₂	
Measurement Range:	0-20,000 ppm
Accuracy:	<3% of reading
Calibration Drift	
Zero Drift [†] :	<0.15 ppm/°C
Span Drift [‡] :	<0.03%/°C
Total Drift [§] at 370 ppm:	<0.4 ppm/°C
RMS Noise at 370 ppm with 1 sec signal filtering:	<1 ppm

- * Zero Drift is the change with temperature at 0 concentration.
- * Span Drift is the residual error after re-zeroing following a temperature change.
- * Total Drift is the change with temperature without re-zeroing or re-spanning.

Measurement Principle:	Non-Dispersive Infrared
Traceability:	Traceable gases to WMO standards from 0 to 3,000 ppm. Traceable gases to EPA protocol gases from 3,000 to 20,000 ppm
Pressure Compensation Range:	15 kPa – 115 kPa
Maximum Gas Flow Rate:	1 liter/min
Output Signals:	Two Analog Voltage (0-2.5V or 0-5V) and Two Current (4-20mA) Digital: TTL (0-5V) or Open Collector
DAC Resolution:	14-bits across user-specified range
Source Life:	18,000 Hours (~2 years continuous use)
Power Requirements:	Input Voltage 12-30 VDC; 1.2A @ 12V (14W) maximum during warmup with heaters on; 0.3A @ 12V (3.6W) average after warmup with heaters on
Operating Temperature Range:	-20 to 45°C
Relative Humidity Range:	0 to 95% RH, Non-Condensing
Dimensions:	8.75" x 6" x 3" (22.23 x 15.25 x 7.62 cm)
Weight:	2.2 lbs. (1 kg)

GLOSARIO

A) ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- **Abreviaturas**

AMM: Asociación Meteorológica Mundial

AMSS: área metropolitana de San Salvador

COV: Compuestos orgánicos volátiles

CFS: Clorofluorocarbonos

FMO: Facultad Multidisciplinaria Oriental

FUSADES: Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social

HC: Hidrocarburos

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático)

MARN: Ministerio de Medioambiente y Recursos Naturales

MP: Material particulado

MSPAS: Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NDIR: non- dispersive infrared radiation

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PCM: Potencial de Calentamiento Global

PPM: Partes por millón

PT_S: Partículas totales suspendidas

PM_{2.5}: Partículas inhalables con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrones

PM₁₀: Partículas inhalables con diámetro aerodinámico menor a 10 micrones

Ppb: producción primaria bruta

- **Símbolos**

A Albedo planetario

A Absorbancia

AD convertidor analógico digital

°C grados Celsius

C velocidad de la luz

CO monóxido de carbono

CO₂ dióxido de carbono

SO₂ dióxido de azufre

K constante de fuerza relacionada con la fuerza de disociación del enlace o fuerza de enlace

K coeficiente de absorción

C N° de partículas

S absorción

T transmitancia

I₀ intensidad de radiación incidente

I_F intensidad de radiación transmitida

R_S	radio del Sol
R_T	radio terrestre
T_T	temperatura efectiva
E_T	energía emitida de la Tierra
F_S	constante solar
μm	micrómetro
φ_{co_2}	concentración de CO_2 tomada desde el Suelo
μ	masa reducida del átomo (g)
λ	número de onda o longitud de onda cm^{-1}
ε	emisividad efectiva
σ	constante de Stefan Boltzman
ν	frecuencia de vibración cm^{-1}

B) PALABRAS

A.

Absorción, dispersión y emisión de radiación

La radiación electromagnética puede interactuar con la materia de distintas maneras, tanto si se trata de átomos o moléculas de un gas (por ejemplo, un gas *atmosférico*) como de partículas sólidas o líquidas (por ejemplo, un *aerosol*). La materia, por sí misma, *emite* radiación en función de su composición y de su temperatura. La radiación puede ser absorbida por la materia, y la energía *absorbida* puede ser, a su vez, transferida o reemitida. Por último, la radiación puede ser también desviada de su trayectoria original (*dispersada*) por efecto de su interacción con la materia.

Acidificación del océano

Disminución del *pH* del agua de mar por incorporación de *dióxido de carbono Antropógeno*.

Albedo

Fracción de *radiación solar* reflejada por una superficie u objeto, frecuentemente expresada en términos porcentuales. El albedo de los suelos puede adoptar valores altos, como en las superficies cubiertas de nieve, o bajos, como en las superficies cubiertas de vegetación y los océanos. El albedo del Planeta Tierra varía principalmente en función de la nubosidad, de la nieve, del hielo, de la superficie foliar y de los cambios en la cubierta del suelo.

Antropógeno

Resultante de la actividad del ser humano o producido por este.

Atmósfera

Envoltura gaseosa que circunda la Tierra. La atmósfera seca está compuesta casi enteramente por nitrógeno (coeficiente de mezclado volumétrico: 78,1%) y oxígeno (coeficiente de mezclado volumétrico: 20,9%), más cierto número de gases traza, como el argón (coeficiente de mezclado volumétrico: 0,93%), el helio, y ciertos gases de efecto invernadero radiativamente activos, como el *dióxido de carbono* (coeficiente de mezclado volumétrico: 0,035%) o el *ozono*. Además, la atmósfera contiene vapor de agua, que es también un gas de efecto invernadero, en cantidades muy variables aunque, por lo general, con un coeficiente de mezclado volumétrico de 1% aproximadamente. La atmósfera contiene también nubes y *aerosoles*.

B.

Balance de energía

Diferencia entre los valores totales de energía entrante y saliente del *sistema climático*. Si el balance es positivo, se produce un calentamiento; si es negativo, sobreviene un enfriamiento. Promediado a nivel mundial y durante largos períodos de tiempo, este balance ha de ser igual a cero. Como el *sistema climático* obtiene virtualmente toda su energía del Sol, un balance nulo implica que a nivel mundial la cantidad de *radiación solar* entrante debe ser, en promedio, igual a la suma de la *radiación solar* reflejada saliente más la *radiación infrarroja térmica* saliente

emitida por el sistema climático. Toda alteración del balance de radiación mundial, ya sea *antropógeno* o natural, se denomina *forzamiento radiativo*

Biocombustible

Combustible producido a partir de materia orgánica o de aceites combustibles de origen vegetal. Son biocombustibles el alcohol, la lejía negra derivada del proceso de fabricación de papel, la madera, o el aceite de soja.

Biomasa

Masa total de organismos vivos presentes en un área o volumen dado; el material vegetal recientemente muerto suele estar conceptualizado como biomasa muerta. La cantidad de biomasa se expresa mediante su peso en seco o mediante su contenido de *energía*, de carbono o de nitrógeno.

Bosque

Tipo de vegetación en que predominan los árboles. Las definiciones de ‘bosque’ en distintos lugares del mundo son muy diversas, en consonancia con la diversidad de condiciones biogeofísicas y de estructuras sociales y económicas. En el marco del *Protocolo de Kioto* rigen ciertos criterios particulares. Este término y otros de parecida índole, como *forestación*, *reforestación* o *deforestación*, se examinan en el Informe especial del IPCC sobre uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2000).

C.

Cambio climático

Variación del estado del *clima* identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a *forzamientos externos* o a cambios *antropógenos* persistentes de la composición de la *atmósfera* o del *uso de la tierra*. La *Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas*, en su Artículo 1, define el cambio climático como “*cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables*”. La CMCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

Ciclo del carbono

Término utilizado para describir el flujo del carbono (en diversas formas; por ejemplo, como *dióxido de carbono*) en la *atmósfera*, los océanos, la *biosfera* terrestre y la *litosfera*.

Ciclo Otto

Es el ciclo termodinámico que se aplica a los motores de combustión interna de encendido provocado (motores de gasolina). Inventado por Nicolaus Otto en 1872.

Se caracteriza porque en una primera aproximación teórica, todo el calor se aporta a volumen constante.

Clima

El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período de promediación habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes correspondientes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del *sistema climático* en términos tanto clásicos como estadísticos. En varios capítulos del presente informe se utilizan también diferentes períodos de promediación, por ejemplo de 20 años.

Combustibles de origen fósil, combustibles fosílicos

Combustibles básicamente de carbono procedentes de depósitos de hidrocarburos de origen fósil, como el carbón, la turba, el petróleo o el gas natural.

Contaminación atmosférica

Es una alteración de la composición normal del aire provocada por la presencia en la atmósfera de una o más sustancias que han sido incorporadas directa o indirectamente por el hombre o por fuentes naturales en cantidades suficientes,

características y duración, tal que puedan afectar adversamente a la flora y fauna, a los materiales y al hombre mismo.

D.

Deforestación

Conversión de una extensión boscosa en no boscosa. Con respecto al término *bosque* y otros términos similares, como *forestación*, *reforestación* o *deforestación*, véase el Informe del IPCC sobre uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2000).

Detectores piroelectricos

Los detectores piroelectricos se construyen con láminas cristalinas de *materiales piroelectricos*, que son aislantes (materiales dieléctricos) con unas propiedades térmicas y eléctricas especiales. En la construcción de detectores de radiación en el infrarrojo el material piroelectrico más utilizado es el sulfato de triglicina ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ (normalmente deuterado o con una fracción de glicina sustituida por alanina)

Dióxido de carbono (CO₂)

Gas que existe espontáneamente y también como subproducto del quemado de combustibles fósiles procedentes de depósitos de carbono de origen fósil, como el petróleo, el gas o el carbón, de la quema de *biomasa*, o de los *cambios de uso de la tierra* y otros procesos industriales. Es el *gas de efecto invernadero antropógeno* que más afecta al equilibrio radiativo de la Tierra. Es también el gas de referencia para la

medición de otros gases de efecto invernadero y, por consiguiente, su *Potencial de calentamiento mundial* es igual a 1.

E.

Efecto invernadero

Los *gases de efecto invernadero* absorben eficazmente la *radiación infrarroja* emitida por la superficie de la Tierra, por la propia *atmósfera* debido a esos mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica es emitida en todas direcciones, en particular hacia la superficie de la Tierra. Por ello, los gases de efecto invernadero retienen calor en el sistema superficie-*troposfera*. Este fenómeno se denomina *efecto invernadero*. La radiación infrarroja térmica de la troposfera está fuertemente acoplada a la temperatura de la atmósfera a la altitud en que se emite. En la troposfera, la temperatura suele disminuir con la altura. De hecho, la radiación infrarroja emitida hacia el espacio proviene de una altitud cuya temperatura promedio es de -19°C , en equilibrio con la *radiación solar* entrante neta, mientras que la superficie de la Tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta, de $+14^{\circ}\text{C}$ en promedio. Un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente, a una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor a una temperatura menor. Ello origina un *forzamiento radiativo* que intensifica el efecto invernadero, suscitando así el denominado *efecto invernadero intensificado*.

Emisión

Es la transferencia o descarga de sustancias contaminantes del aire desde la fuente a la atmósfera libre. El punto o la superficie donde se efectúa la descarga se denomina

"fuente". Este término se utiliza para describir la descarga y el caudal de esa descarga.

Emisiones antropógenas

Emisiones de *gases de efecto invernadero*, de precursores de gases de efecto invernadero y de *aerosoles* aparejadas a actividades humanas, como la combustión de *combustibles de origen fósil*, *la deforestación*, *los cambios de uso de la tierra*, la ganadería, la fertilización, etc.

Emisiones de Gases de Escape

Son las cantidades de Hidrocarburos (HC), Monóxido de Carbono (CO) y Óxidos de Nitrógeno (NOx) emitidas a la atmósfera a través del escape de un vehículo como resultado de su funcionamiento.

Espectroscopia infrarroja

Se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias a las cuales rotan y vibran, es decir, los movimientos de rotación y vibración moleculares tienen niveles de energía discretos (modos normales vibracionales).

Estratosfera

Región de la *atmósfera* muy estratificada, situada sobre la *troposfera*, que abarca desde los 10 km (9 km en latitudes altas y 16 km en los trópicos, en promedio) hasta los 50 km de altitud, aproximadamente.

F.**Forzamiento radiativo**

Cambio de la irradiancia neta (la ascendente menos la descendente), expresado en watos por metro cuadrado (W/m^2), en la *tropopausa* por efecto del cambio de un originante externo del *sistema climático* (por ejemplo, un cambio de la concentración de *dióxido de carbono*, o de la energía emitida por el Sol). El forzamiento radiativo se calcula manteniendo fijas todas las propiedades de la *troposfera* y sus valores no perturbados, y permitiendo que las temperaturas de la *estratosfera*, una vez perturbadas, se reajusten hasta alcanzar el equilibrio dinámico radiativo. El forzamiento radiativo se denomina *instantáneo* cuando no contempla ninguna variación de la temperatura de la estratosfera. A los efectos del presente informe, el forzamiento radiativo se define como el cambio acaecido respecto del año 1750 y, a menos que se indique lo contrario, denota un valor promediado en términos mundiales y anuales.

Fotosíntesis

Proceso en virtud del cual las plantas verdes, las algas y ciertas bacterias toman *dióxido de carbono* del aire (o bicarbonato del agua) para elaborar hidratos de carbono. Hay varias vías de fotosíntesis posibles, con diferentes respuestas a las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera.

Fuente Móvil

Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse. Son fuentes móviles los vehículos automotores, las motocicletas, los motociclos y los mototriciclos.

G.

Gas de efecto invernadero, (GEI)

Componente gaseoso de la *atmósfera*, natural o *antropógeno*, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de *radiación infrarroja térmica* emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al *efecto invernadero*. El vapor de agua (H₂O), el *dióxido de carbono* (CO₂), el *óxido nitroso* (N₂O), el *metano* (CH₄) y el Ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. La atmósfera contiene, además, cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógenos, como los *halocarbonos* u otras sustancias que contienen cloro y bromo, contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, del N₂O y del CH₄, el *Protocolo de Kioto* contempla los gases de efecto invernadero *hexafluoruro de azufre* (SF₆), los *Hidrofluorocarbonos* (HFC) y los *Perfluorocarbonos* (PFC).

H.

Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Uno de los seis *gases de efecto invernadero* que el *Protocolo de Kioto* se propone reducir. Se utiliza profusamente en la industria pesada para el aislamiento de equipos de alta tensión y como auxiliar en la fabricación de sistemas de refrigeración de cables y de semiconductores.

Hidrocarburo

Grupo de contaminación emitido por los motores de combustión interna debido a la falta de combustión o por evaporación. Es combustible no quemado.

Hidrofluorocarbonos (HFCs)

Uno de los seis gases o grupos de *gases de efecto invernadero* cuya presencia se propone reducir el *Protocolo de Kyoto*. Son producidos comercialmente en sustitución de los clorofluorocarbonos. Los HFCs se utilizan ampliamente en refrigeración y en fabricación de semiconductores.

L.**Límite de emisión de un contaminante a la atmosfera**

Es la concentración máxima de emisión permisible de un contaminante atmosférico proveniente de una fuente móvil, establecido para proteger la salud y el medio ambiente.

M.**Monóxido de carbono**

Contaminante emitido por los motores de combustión interna debido a una combustión incompleta. Es combustible parcialmente quemado.

Motor de encendido por chispa

Motor de combustión interna en el cual la mezcla de aire- combustible, es encendido mediante una chispa eléctrica.

Motor diésel

Motor de combustión interna en el cual el combustible inyectado es encendido por compresión.

Metano (CH₄)

El metano es uno de los seis *gases de efecto invernadero* que el *Protocolo de Kyoto* se propone reducir. Es el componente principal del gas natural, y está asociado a todos los hidrocarburos utilizados como combustibles, a la ganadería y a la agricultura. El *metano de estrato carbónico* es el que se encuentra en las vetas de carbón.

O.**Opacidad**

Es el grado en el cual las emisiones reducen la transmisión de luz y oscurece la visión de un objeto en el entorno.

Óxido nitroso (N₂O)

Uno de los seis tipos de *gases de efecto invernadero* que el *Protocolo de Kyoto* se propone reducir. La fuente antropógena principal de óxido nitroso es la agricultura (la gestión del suelo y del estiércol), pero hay también aportaciones importantes provenientes del tratamiento de aguas residuales, del quemado de combustibles fósílicos y de los procesos industriales químicos. El óxido nitroso es también producido naturalmente por muy diversas fuentes biológicas presentes en el suelo y

en el agua, y particularmente por la acción microbiana en los bosques tropicales pluviales.

Ozono (O₃)

Forma triatómica del oxígeno (O₃); uno de los componentes gaseosos de la *atmósfera*. En la *troposfera*, el ozono se genera tanto espontáneamente como mediante reacciones fotoquímicas de gases resultantes de actividades humanas (smog). El ozono troposférico actúa como *gas de efecto invernadero*. En la *estratosfera*, el ozono es generado por la interacción entre la radiación ultravioleta solar y las moléculas de oxígeno (O₂). El ozono estratosférico desempeña un papel fundamental en el equilibrio radiativo de la estratosfera. Su concentración más alta se encuentra en la capa de ozono.

P.

Partes por millón

Es una unidad para expresar la concentración de soluto en solvente y expresa la proporción en que se encuentran los moles de soluto con respecto a los moles totales de la solución

Perfluorocarbonos (PFC)

Uno de los seis grupos de *gases de efecto invernadero* que el *Protocolo de Kyoto* se propone reducir. Son subproductos de la fundición del aluminio y del enriquecimiento del uranio. Sustituyen también a los *clorofluorocarbonos* en la fabricación de semiconductores.

Potencial de calentamiento mundial (PCM)

Índice basado en las propiedades radiativas de una mezcla homogénea de *gases de efecto invernadero*, que mide el *forzamiento radiativo* producido por una unidad de masa de un *gas de efecto invernadero* homogéneamente mezclado en la *atmósfera* actual, integrado a lo largo de determinado horizonte temporal, respecto del forzamiento por *dióxido de carbono*. El PCM representa el efecto combinado de los diferentes períodos de permanencia de esos gases en la atmósfera, y su eficacia relativa de absorción de la *radiación infrarroja saliente*. El *Protocolo de Kyoto* está basado en los PCM de los impulsos de emisión a lo largo de 100 años.

Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto de la *Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC)* de las Naciones Unidas fue adoptado en el tercer período de sesiones de la Conferencia de las Partes (COP) en la CMCC, que se celebró en 1997 en Kyoto. Contiene compromisos jurídicamente vinculantes, además de los señalados en la CMCC. Los países del *Anexo B* del Protocolo (la mayoría de los países de la Organización de Cooperación Desarrollo Económicos y de los países de *economía en transición*) acordaron reducir sus emisiones de *gases de efecto invernadero antropógenos* (*dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, Hidrofluorocarbonos, Perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre*) en un 5% como mínimo por debajo de los niveles de 1990 durante el período de compromiso de 2008 a 2012. El Protocolo de Kyoto entró en vigor el 16 de febrero de 2005.

R

Radiación infrarroja térmica

Radiación emitida por la superficie de la Tierra, por la *atmósfera* y por las nubes. Se denomina también *radiación terrena o de gran longitud de onda*, y no debe confundirse con la radiación cuasi-infrarroja del espectro solar. Por lo general, la radiación infrarroja abarca un intervalo característico de longitudes de onda (*espectro*) más largas que la del rojo en la parte visible del espectro. En la práctica, el espectro de la radiación infrarroja térmica es distinto del de la *radiación de onda corta o solar*, debido a la diferencia de temperaturas entre el Sol y el sistema Tierra-atmósfera.

Radiación solar

Radiación electromagnética emitida por el Sol. Se denomina también *radiación de onda corta*. La radiación solar abarca un intervalo característico de longitudes de onda (espectro), determinado por la temperatura del Sol, cuyo máximo se alcanza en el espectro visible. Véase también *Radiación infrarroja térmica*, *Irradiancia solar total*.

Revolución industrial

Período de rápido crecimiento industrial, con consecuencias sociales y económicas de gran alcance, que comenzó en Gran Bretaña en la segunda mitad del siglo XVIII, extendiéndose después a Europa y, posteriormente, a otros países, entre ellos Estados Unidos. El invento de la máquina de vapor fue uno de sus principales desencadenantes. La revolución industrial señala el comienzo de un fuerte aumento

de la utilización de *combustibles fósílicos* y de las emisiones, particularmente de *dióxido de carbono* de origen fósil.

V

Valor k

Coeficiente absorción de la luz por metro utilizado como unidad internacional para la medición de la opacidad.

Vibraciones de flexión

Se caracterizan por un cambio en el ángulo entre dos enlaces, y son de cuatro tipos: de *tijereteo*, de *balanceo*, de *aletas* y de *torsión*.

Vibración de tensión

Supone un cambio continuo en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos.